Netzwerkplanung im Baubetrieb

Dissertation
zur Erlangung des wirtschaftswissenschaftlichen Doktorgrades
der Wirtschafts- und Sozialwissenschaftlichen Fakultät
der Georg-August-Universität zu Göttingen

vorgelegt von

Hans Jürgen Ebel
aus Königsberg

Göttingen 1966

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41544307_0017

Netzwerkplanung im Baubetrieb

Dissertation
zur Erlangung des wirtschaftswissenschaftlichen Doktorgrades
der Wirtschafts- und Sozialwissenschaftlichen Fakultät
der Georg-August-Universität zu Göttingen

vorgelegt von

Hans Jürgen Ebel
aus Königsberg

Göttingen 1966

UNIVERSITEITSBIBLIOTHEEK - LEIDEN -

Berichterstatter: Professor Dr. Adolf Angermann

Mitberichterstatter: Professor Dr. Wolfgang Lücke

Tag der mündlichen Prüfung: 25. Juli 1966

INHALTSVERZEICHNIS

		Seite
Einleitung		1
1	Grundlagen der Netzwerkplanung	3
11	Entwicklung und Ziele der Netzwerkplanung	3
12	Strukturanalyse - Netzwerkdarstellung bei CPM und PERT	14
121	Netzwerkelemente	15
1211	Ereignis	15
12111	Normales Ereignis	15
12112	Meilensteine	16
1212	Aktivität	17
12121	Normale Aktivität	17
12122	Blindaktivität	18
12123	Untergliederte Aktivität	20
12124	Zusammenfassung von Aktivitäten	21
12125	Anlaufzeitaktivitäten	22
12126	Zeitliche Beschränkungen	23
122	Arten der Netzwerkdarstellung	24
1221	Das ereignisorientierte Netzwerk	24
1222	Das aktivitätsorientierte Netzwerk	25
1223	Das aktivitätsorientierte Netzwerk in der ereignisbezogenen Form	26
123	Regeln für das Aufstellen von Netzwerken	27
13	Zeitanalyse - mathematische Grundlagen	28
131	Zeitanalyse bei CPM	29
1311	Bestimmung der einzelnen Aktivitätszeiten	30
13111	Die progressive Methode	30
13112	Die retrograde Methode	32
1312	Bedeutung und Arten des Schlupfes	34
1313	Schlupfzeitpräferenzen	36
1314	Der kritische Weg	38
132	Zeitanalyse bei PERT	39
1321	Zeitschätzungen für die Aktivitäten	39
13211	Ermittlung des Erwartungswertes (te)	39
13212	Berechnung der Varianz σte^2	46
1322	Zeitpunkte der Ereignisse	48
1323	Schlupfzeiten und kritischer Weg	48
1324	Terminüberwachung	49
13241	Wahrscheinlichkeitsverteilung des Schlupfes	50
13242	Wahrscheinlichkeit für die Einhaltung eines geplanten Termines	52
13243	Möglichkeiten der Plankorrektur	54

Seite

2 Anwendungsmöglichkeiten der Netzwerkplanung im Baubetrieb 55

21 Strukturprobleme des Baubetriebes 55
211 Wechselnde Betriebsstätten 56
212 Langfristige Einzelfertigung 58
213 Abhängigkeit der Bauarbeiten von den Witterungsverhältnissen 60
214 Auftragsfertigung 61
22 Vorteile der Netzwerkplanung gegenüber den herkömmlichen Methoden 63
23 Organisatorische Fragen 66
231 Verfahrensauswahl 66
232 Planungsteam 68
233 Plankorrektur- und Berichtswesen 71
234 Einsatz elektronischer Datenverarbeitungsanlagen 75
24 Struktur- und Zeitanalyse 75
241 Auflistung der einzelnen Vorgänge 75
242 Netzwerkkonstruktion 77
243 Berechnung des Netzes 78
25 Kostenoptimierung 86
251 Einführung und Problemstellung 86
252 Voraussetzungen für die Anwendung der Kostenoptimierung im Baubetrieb 100
253 Manuelle Berechnung der kostenoptimalen Projektdauer 104
26 Optimale Zuordnung des Produktionspotentials 120
261 Einführung und Problemstellung 120
262 Lösungsansätze 122
2621 Manpower Smoothing 122
2622 Manpower Scheduling 128
2623 Methode des Leitweges 132
27 Mehrprojektplanung 134
271 Einführung und Problemstellung 134
272 Zeitschätzung und Potentialzuteilung bei RAMPS 137
2721 Ermittlung der Arbeitsmenge 137
2722 Zusammenstellung der Faktorgruppe 138
2723 Verfügbare Produktionsfaktoren 141
2724 Steuerungsdaten 142
273 Mehrprojektplanung mit einem Strategieplan 150

3 Schlußbetrachtung 156

Literaturverzeichnis I

Anhang

EINLEITUNG

Planung ist der Entwurf "einer Ordnung, in der ein konkreter Prozeß als sich vollziehend gedacht wird."[1] Betriebswirtschaftlich ist Planung "somit ein produktiver Akt, der die Fertigung an Ort und Stelle soweit als möglich von der Aufgabe entlastet, erst in der bedränglichen Fülle und Unübersehbarkeit des technischen, betriebswirtschaftlichen, organisatorischen Geschehens nach einem Weg zu suchen, der den reibungslosen Ablauf der Fertigung gewährleistet."[2] Planung ist daher das Gegenstück zur Improvisation und unterliegt einem Erwartungsrisiko, welches sich aus der Unsicherheit der zugrundegelegten Plandaten ergibt.[3]

Von der Planungsaufgabe her kann man unterscheiden zwischen:

a) Der Planung des Fertigungsprogrammes (was soll produziert werden?)

b) Der Planung des Fertigungsprozesses (wie soll produziert werden?)

Die Planung des Fertigungsprozesses (Vollzugsplanung) kann weiter unterteilt werden in eine:

aa) Bereitstellungsplanung (welche Produktionsfaktoren sind für die vorgegebene Produktion erforderlich?)

bb) Ablaufplanung (wie soll der zeitliche Ablauf der Produktion durchgeführt werden?)[4]

Im folgenden soll versucht werden, ein Verfahren für die Fertigungsvollzugsplanung eines Baubetriebes zu entwickeln, wobei die "einschneidende Eigenge-

---

1) Gutenberg, E., Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre, 1.Bd. "Die Produktion", Berlin-Göttingen-Heidelberg 1960, Fünfte Aufl., S. 121

2) ebenda

3) Vergl. Agthe, K., Das Problem der unsicheren Erwartungen bei unternehmerischen Planungen und Entscheidungen, in: Unternehmungsplanung, Hersg. Agthe-Schnaufer, Baden-Baden 1963, S. 83 ff

4) Vergl. Gutenberg, E., a.a.O., S. 114 ff

setzlichkeit der Bauproduktion"[1] zu beachten ist. Besonders soll hierbei das "Ablaufplanungsdilemma" bei Einzelfertigung berücksichtigt werden. Es ist zu zeigen, daß die Lösung dieser Aufgabe (Optimierung von Durchlaufzeiten und Auslastung der Produktionskapazität) für den Baubetrieb nicht nur "e i n e K u n s t"[2] ist, sondern daß neu entwickelte Operations-Research-Verfahren es ermöglichen, dieses Problem zu quantifizieren und wirtschaftlich zu lösen.

Die Notwendigkeit, quantitative Entscheidungsmodelle zu entwickeln und sinnvoll einzusetzen, ergibt sich aus dem Wirtschaftlichkeitsprinzip. Intuition und Improvisation sollten daher auch im Baubetrieb nur dort angewandt werden, wo geeignete Lösungsansätze bislang fehlen.

Die in der Baupraxis übliche Lösung von Ablaufplanungsaufgaben mit Hilfe von Balkendiagrammen als "Bauzeitenplan" ist unzureichend, da sie sich nur auf die Zeitplanung erstreckt und Kapazitäts- und Kostengesichtspunkte weitgehend unberücksichtigt bleiben. Darüber hinaus ist auch der Aussagewert dieser Zeitplanung gering, so daß die nachfolgenden Überlegungen berechtigt erscheinen.

Im ersten Hauptteil werden die theoretischen Grundlagen der Netzwerkplanung - soweit wie sie zum Verständnis dieser Arbeit erforderlich sind - wiedergegeben. Anschließend wird versucht, aus den bislang gewonnenen Erkenntnissen ein umfassendes Planungsinstrument für einen Baubetrieb zu entwickeln, so daß sowohl Zeit-, Kosten- als auch Kapazitätsgesichtspunkte erfaßt und berücksichtigt werden können. Da realisierbare Planungsverfahren auf "der Eigengesetzlichkeit der Bauproduktion" aufbauen müssen, wird im zweiten Hauptteil zunächst ein Überblick über die strukturelle Eigenart der Bauproduktion gegeben.

---

1) Burckhardt, G., Kostenprobleme der Bauproduktion, in: Schriftenreihe des Bayrischen Bauindustrieverbandes Nr. 3, Wiesbaden-Berlin 1963, S. 75 ff u. S. 177. Über die Notwendigkeit und Bedeutung einer wissenschaftlichen Methodik zur Betriebsplanung, Arbeitsvorbereitung und Maschineneinsatzplanung für die Bauproduktion s. besonders S.177-178

2) Vergl. Gutenberg, E., a.a.O., S. 159

1 Grundlagen der Netzwerkplanung

11 Entwicklung und Ziele der Netzwerkplanung

Die Schwächen der herkömmlichen Verfahren der Projektplanung und -überwachung (Balkendiagramme, Gantt-Diagramme) wurden bei der Durchführung großer und komplexer Projekte in den U.S.A. deutlich.[1] So war weder die Abhängigkeit der einzelnen Aufgaben voneinander aus den Balkendiagrammen ersichtlich, noch zeigten sich diese gegenüber Projektänderungen als ausreichend beweglich. Auch das "Entscheidungsrisiko" der Planung blieb unberücksichtigt.

Um diese Mängel zu beseitigen, entwickelte man in den U.S.A. Verfahren, die auf der Netzwerktechnik aufbauen. Besondere Beachtung haben hierbei CPM (Critical Path Method = Methode des kritischen Weges) und PERT (Program Evaluation and Review Technique = Programm-Bewertungs- und -prüfungstechnik) gefunden. CPM wurde 1957 von den Firmen "du Pont" und "Remington Rand Univac" publiziert.[2] Etwa zur gleichen Zeit wurde - unabhängig davon - PERT von der U.S. Navy in Zusammenarbeit mit den Firmen "Booz-Allen und Hamilton" und "Lockheed Missile System Division" für die Planung militärischer Projekte (Polarisrakete) entwickelt.[3] Die erste Anwendung von CPM erfolgte bei "du Pont", wo der Neubau einer chemischen Anlage und Instandsetzungsarbeiten geplant und überwacht wurden.[4] Ebenso erfolgreich

---

1) Vergl. Dean K.L., Fundamentals of Network Planning and Analysis, Sonderdruck der Remington Rand Univac, Military Department, PX 1842 B, 1962, S. 3

2) Vergl. s.hierzu die grundlegende Arbeit von Kelley, J.E. und Walker M.R.: Critical Path Planning and Scheduling in: Proc. of the Eastern Joint Comp. Conference, Boston, Dec. 1959, S. 167 ff.

3) Vergl. s.hierzu: Malcolm, D.G., Roseboom, J.H., Clark, C.E., Fazar, W.: Application of a Technique for Research and Development Program Evaluation in: The Journal of the Operations Research Society of America, Vol. 7/no.5,1959, S. 646 ff.

4) Vergl. Martino R.L.: How "Critical-Path" scheduling works, in: Canadian Chemical Processing,

wie CPM zeigte sich PERT bei der Planung des Polarisprojektes, das 1 1/2 Jahre früher als ursprünglich angenommen, mit Hilfe von PERT fertiggestellt werden konnte. Beide Verfahren sind in den letzten Jahren ergänzt worden. Darüber hinaus wurden über 1oo weitere Planungsverfahren, die auf der Netzwerktechnik aufbauen, veröffentlicht.[1] Vielfach bestehen jedoch nur geringe oder sogar nur terminologische Unterschiede.[2] Neben PERT und CPM haben nachfolgende Verfahren Bedeutung gefunden:[3]

LESS (Least Cost Estimating and Scheduling) ist eine Weiterentwicklung von CPM durch die Firma IBM. Besondere Berücksichtigung findet bei LESS das Kapazitätsproblem. "Manpower scheduling" (Ablaufplanung für Arbeitskräfte) und "manpower smoothing" (Ausgleich der Arbeitskräftebeanspruchung) sind hierbei besonders im Hinblick auf die Bauindustrie von Interesse.[4]

---

1) Vergl. U.S. Air Force, PERT Orientation and Training Center, Glossary of Management Systems Terminology, Bolling Air Force Base, Washington D.C. June 1963, und
U.S. Air Force, PERT Orientation and Training Center, Bibliography: PERT and other Management Systems and Techniques, Bolling Air Force Base, Washington, D.C. June 1963.

2) Vergl. Dooley, Arch. R. Interpretations of PERT in: Haward Buisiness Review, March/April 1964, S. 162.

3) Vergl. über die Entwicklung der Netzwerkplanung s. Sobczak, Th.; A Look at Network Planning in IRE Transactions on Engineering Management, Sept.1962, No. 3, S. 113 ff

4) Vergl. ausführlich hierzu im folgenden sowie Kattwinkel, W.: Neue Methoden zur Projektplanung und -überwachung, IBM Deutschland 1962, Kattwinkel, W.; über 2 Anwendungsmöglichkeiten von Netzwerken mit gerichteten Teilstrecken, IBM Fachbibliothek, IBM Form 781o1.

RAMPS (Resource Allocation and Multi-Project Scheduling) ermöglicht die simultane Planung mehrerer Projekte.[1] Dieses System baut auf der CPM-Technik auf. Im Gegensatz hierzu wird jedoch bei RAMPS die Planungsinterdependenz zwischen den einzelnen Projekten berücksichtigt.[2]

PROMOCOM (Project Monitor and Control Method) ist eine Netzwerk-Planungsmethode, die von General-Electric entwickelt wurde. Neben der Berechnung der Planwerte - entsprechend CPM - enthält das PROMOCOM-Programm eine übersichtliche "Fortschritt-Berichterstattung", so daß hiermit - zusätzlich zur Planung - eine systematische Berichterstattungs- und Überwachungsmethode gegeben ist. Die regelmäßig erscheinenden Grundrapporte (monitor reports) basieren auf Kalenderdaten und in ihnen sind die zeitlichen Veränderungen im Arbeitsablauf enthalten. Darüber hinaus enthält das Programm Zusatzrapporte wie den "monitor critical path report", der den Verlauf des kritischen Weges anzeigt, und den "duration and scheduled finish date change report", der die während der Kontrollperiode veränderten Vorgabezeiten wiedergibt. Voraussetzung für die Anwendung von PROMOCOM ist ein leistungsstarker Computer.[3]

---

1) Auf RAMPS wird in anderem Zusammenhang noch näher eingegangen.

2) Vergl."RAMPS is an extension of the logic of critical path scheduling techniques for single projects. While the latter determines the best timing for each separate project, it does so without regard to the effect of all other work. RAMPS, by treating all work simultaneously, considers the competition between jobs and finds the best compromise between individual and overall requirements," in RAMPS - a new development in scheduling. Du Pont Engineering Progress 2 (1962) 1, item 433

3) Vergl. ausführlich zu PROMOCOM: General Electric Computer Department: GE 225 - project monitor and control method applications manual. Preliminary. Phoenix 1963,
sowie Weber, K.: Planung mit CPM und PERT, in: Industrielle Organisation, Nr. 6, 1964, S. 239 f.

PERT/COST baut auf dem normalen PERT-System auf und wurde vom amerikanischen Verteidigungsministerium in Zusammenarbeit mit der NASA (National Aeronautics and Space Administration) und Auftragnehmern der Privatindustrie entwickelt.

PERT/COST soll zusätzlich zur Zeitplanung und Terminüberwachung eine Kostenkontrolle des Projektes ermöglichen. Zunächst wird vor Projektbeginn ein Kostenplan aufgestellt, dessen Soll-Werte dann bei der Durchführung fortlaufend mit den Ist-Werten verglichen werden. Durch den ständigen Vergleich von Projektfortschritt und Budgetverbrauch ist eine frühzeitige Prognose der Budgetüber- oder -unterschreitungen des gesamten Projektes möglich. Weiterhin werden im PERT/COST-System Kapazitätsbelastungspläne maschinell ausgeschrieben, die den einzelnen Betriebsabteilungen eine optimale Auslastung der Aggregate ermöglichen.[1)]

PACT (Production Analysis Control Technique) ist gleichfalls eine Weiterentwicklung von PERT. "The basic concept is to forecast, production slippages in ample time to take corrective action".[2)] Von der Navy wurde PACT für die Überwachung von Lieferterminen entwickelt.

SPECTROL ist ein Netzwerkplanungsverfahren, das "Meilensteine" als besondere Kontrollpunkte verwendet. Neben der Zeit- und Kostenplanung sowie Kontrolle des Projektablaufes ermöglicht dieses Programm die Ausgabe von Alternativplänen.
SCANS (Scheduling, Control by Automated Network

---

1) Vergl. DOD/NASA, PERT/COST Guide, U.S. Goverment Printing Office, Washington 1962.

2) Special Projects Office, Program Evaluation Branch Department of the Navy; "Production Analysis Control Technique". Washington D.C., Feb. 8. 1961 -

Systems) ist eine Weiterentwicklung von SPECTROL.[1] Während PERT eine integrative Großprojektplanung mit vielen Zulieferbetrieben ermöglicht, zielt SCANS auf die Simultanplanung eines Betriebes mit mehreren Produkten ab. Ausgabedaten des SCANS-Programmes sind u.a.:

1. Wie lange, wieviele Arbeitskräfte und welche Kosten benötigt der Projektabschluß.

2. Welche Aktivitäten können verändert werden, um ein Optimum von Zeit, Arbeitskräften und Kosten zu erreichen.

3. Wie wirken sich Zeitüberschreitungen auf die einzelnen Projekte aus.

4. Wie groß ist das Kosten- und Arbeitskräftebudget, um alle Planziele zu erreichen.

5. Welche Aufgaben sind in den nächsten 2 Wochen in Angriff zu nehmen und welche werden voraussichtlich in dieser Zeit beendet sein.

6. Überprüfung von Zeit-, Kosten- und Arbeitskräfteplanung.

IMPACT (Implementation, Planning and Control Technique) wurde speziell für die Aufgaben, die beim Einsatz von EDP-Anlagen regelmäßig auftreten, ent-

---

1) Vergl. Progress Report, Phase II 'Spectrol" SDC Field Note No. 3783 sowie "The Development of SCANS", SDC Field Note No. 4556 und Frey, B.L.; "SCANS-System Description and Comparison with PERT". Ire Transactions on Engineering Management, Sept. 1962, No. 3, S. 122 ff.

Sobczak a.a.O., S. 116 :"SCANS system was designed to provide a management control system which would integrate scheduling, costing and manpower loading in a meaningful manner one that provides for tradeoffs between functions."

wickelt. Die Besonderheit von IMPACT besteht darin, daß mit einem vorgegebenen Netzwerk von 63 Ereignissen gearbeitet wird.[1)]

DBPS (Decision-Box-Planning- and Scheduling) ist ein Netzwerkplanungssystem, das Entscheidungsereignisse enthält und dann anwendbar ist, wenn die Struktur des Netzwerkes nicht durch logische Zusammenhänge eindeutig festliegt (z.B. bei Forschungsobjekten). Entscheidungsereignisse werden dort in das Netzwerk eingebaut, wo Alternativen möglich sind. Eisner[2)] unterscheidet bei Entscheidungsereignissen zwischen konjunktiven Wegen (2 Wege, die von einem Entscheidungsereignis wegführen und die beide beschritten werden können) und disjunktiven Wegen (2 Wege, die i. S. einer Alternative nie gleichzeitig durchgeführt werden können).

DBPS informiert über:

1. die Wahrscheinlichkeiten für die verschiedenen Entscheidungssituationen;
2. die Dauer bis zu den jeweiligen Ereignissen;
3. die jeweils aufzuwendenden Kosten.

PERT und CPM können als degenerierte DBPS-Programme angesehen werden, da bei einer logisch bestimmten Ereignisfolge die Entscheidungswahrscheinlichkeit 1 gegeben ist.

---

1) Vergl. Computer Dynamics Corporation: Computer services for industry and goverment; Silver Spring. o.J. sowie Hansen, B.J.: IMPACT an implementation planning and control technique for managing the development of computer systems, Silver Spring 1963. und Beller, W.: IMPACT is boom to computer users, Missiles and Roekets 12 (1963) 2, 14. Jan.

2) Vergl. Eisner, H.: "A Generalised Network Approral to the Planning and Scheduling of a Research Program", Oper. Research 1962, No. 1.

Die Potentialmethode (méthode des potentiels) baut auf der Graphentheorie auf und wurde in Frankreich (Société d'Economie et de Mathématique Appliquées, Paris) entwickelt.[1] Im Gegensatz zu den amerikanischen Netzwerkplanungsverfahren ist jeder Job nicht einer Aktivität zugeordnet, sondern einem Ereignis (Knoten). Der Ausgangspunkt des Projektes ist ein O - Knoten, der als fiktiver Arbeitsgang anzusehen ist. Die Pfeile stellen die Ereignisse dar und geben die Beziehungen zwischen den einzelnen Tätigkeiten an, wobei die Pfeile die zeitlichen Abstände zwischen dem Anfang der Arbeitsgänge kennzeichnen. Ist z.B. d (i) die erforderliche Zeit für die Durchführung der Tätigkeit i, so bedeutet der Pfeil von i nach j, daß die Tätigkeit j frühestens nach d(i) Zeiteinheiten nach dem Start von i beginnen kann.

Abb. 1/2 sollen den Unterschied zwischen der PERT- und CPM-Netzwerkdarstellung einerseits und dem Netzwerkaufbau der Potentialmethode andrerseits verdeutlichen.[2]

---

1) Die Bezeichnung Potentialmethode ist eine Übersetzung des französ. "méthode des potentiels". Dieser Begriff stammt aus der Graphentheorie und ist ein Lösungsverfahren zur Wegbestimmung. S. hierzu: von Falkenhausen, H.: Prinzipien und Rechenverfahren der Netzplantechnik. ADL-Nachrichten Nr. 33, 1964, S. 278 f.

2) Entnommen aus: Kaufmann, A und Desbazeille, G.: Ordonnancement et Programmes (Système PERT). Bull-Information Paris, O.J., S. 6 ff. Diese Schrift enthält ausführliche Literaturangaben über die Potentialmethode.

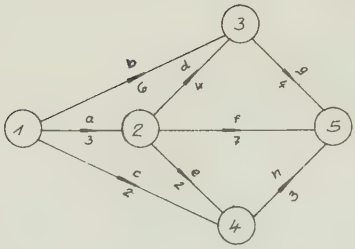


Abb. 1

Bei der PERT- und CPM-Netzwerkdarstellung stellen die Kreise (Knoten) die Ereignisse dar. Die Pfeile entsprechen den Arbeitsgängen.

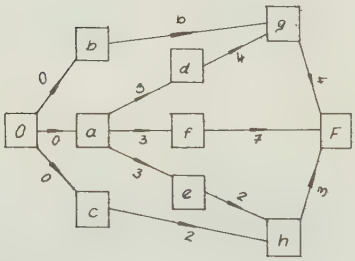


Abb. 2

Bei der Netzwerkdarstellung der Potentialmethode geben die Karées (Knoten) die Arbeitsgänge wieder, während die Pfeile den Zeitbedarf anzeigen.

Die Tätigkeit g folgt in Abb. 2 den Tätigkeiten b und d mit der Dauer von 6 bzw. 4 Zeiteinheiten, wobei durch die Pfeile bg (6) und dg (4) angegeben wird, daß der Beginn der Tätigkeit g frühestens 6 Zeiteinheiten nach dem Beginn von b und 4 Zeiteinheiten nach dem Start von d erfolgen kann.

Soll mit Hilfe der Potentialmethode ein Netzwerk mit n Aufgaben a, b, c .. i .. n der Dauer d(a), d(b) .. d(c) .. d(n) durchgeführt werden, wobei die Variablen t(a), t(b) .. t(i) .. t(n) als Startzeitpunkte der einzelnen Aufgaben die Unbekannten sind, so müssen hierbei vier Beziehungen unterschieden werden.[1)]

1. Der Arbeitsgang i kann erst e(i) Zeiteinheiten nach Projektstart beginnen (Lieferbeschränkungen).

$$t(i) \geq e(i)$$

2. Der Arbeitsgang i soll zu einem festen Zeitpunkt f(i) beendet sein (Meilenstein).

$$t(i) + d(i) \leq f(i)$$

3. Die Aufgabe j kann erst beginnen, wenn eine Aufgabe i ein bestimmtes Fertigungsstadium erreicht hat, was durch den Koeffizienten k(i,j) angegeben wird.

$$t(j)-t(i) \geq k(i,j)\ d(i), \text{ wobei } k(i,j) \leq 1$$

4. Die Aufgabe j soll beginnen, bevor i ein bestimmtes Fertigungsstadium erreicht hat.

$$t(j)-t(i) \leq k'(i,j)\ d(i), \text{ wobei } k'(i,j) \leq 1$$

Für diese Bedingungen können gerichtete Kanten eines Graphen eingesetzt werden, wenn man den Anfangspunkt O mit der entsprechenden Variablen t_o einführt und die obigen Beziehungen einheitlich in $\geq$ Beziehungen umformt.[2)]

---

1) Vergl. Algan, M.: Reihenfolgeprobleme und Graphentheorie, Bd. 8, 1964, S. 56 ff.

2) Anmerkung: Ein Graph besteht aus mehreren Knoten, von denen einige durch gerichtete Kanten verbunden sind. In der Potentialmethode entsprechen die Knoten den Aufgaben und die gerichteten Kanten den Pfeilen.

1.) $t(i) - t(O) \geq e(i)$

[≙ gerichtete Kanten vom Knotenpunkt O bis zum Knotenpunkt i der Länge e(i)]

2.) $t(O) - t(i) \geq d(i) - f(i)$

[≙ gerichtete Kanten vom Knotenpunkt i bis zum Knotenpunkt O der positiven oder negativen Länge d(i) - f(i)]

3.) $t(j) - t(i) \geq k(i,j)\ d(i)$

[≙ gerichtete Kanten von i bis j der Länge $k(i,j)\ d(i)$]

4.) $t(i) - t(j) \geq k'(i,j)\ d(i)$

[≙ gerichtete Kanten j,i der negativen Länge $-k'(i,j)\ d(i)$] .

Abb. 3 soll obiges Ungleichungssystem mit den zugehörigen gerichteten Kanten - das als "Problem der Potentiale" bezeichnet wird - verdeutlichen.[1)]

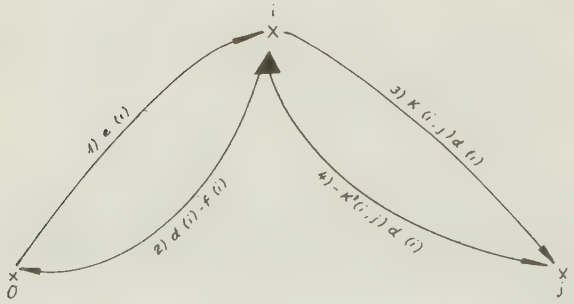


Abb. 3

1) Vergl. Algan, M.: a.a.O., S. 57

Aus dem Ungleichungssystem ergibt sich für die Pfeile, die diesen Bedingungen entsprechen:

1. Die linke Seite der Ungleichung kennzeichnet die Pfeilrichtung, wobei der Pfeil vom Index des negativen zum Index des positiven Summanden zeigt.
2. Die zeitliche Ausdehnung des Pfeiles wird durch die rechte Seite der Ungleichung bestimmt.
3. Schleifen im Netz sind möglich, wenn ihre Länge ≤ 0.

Vorteil der Potentialmethode ist eine größere Flexibilität des Netzwerkes, so daß auch Reihenfolgeprobleme gelöst werden können, bei denen die Anordnungsbeziehungen nicht eindeutig feststehen.[1)]

Die Potentialmethode unterscheidet sich von CPM und PERT im wesentlichen nur durch die Strukturanalyse des Netzwerkes.[2)] Die im folgenden entwickelten Algorithmen zur Zeitbestimmung und Kostenoptimierung können deshalb entsprechend angewandt werden.

---

1) Vergl. Algan, M.: Reihenfolgeprobleme und Graphentheorie, Metra 2 (1963), S. 5 ff. sowie die dort angegebene Literatur.

2) Vergl. Kaufmann, A.; Desbazeille, G.: a.a.O., S. 8

12 Strukturanalyse - Netzwerkdarstellung bei CPM und PERT

Die bereits angedeuteten Unzulänglichkeiten der herkömmlichen Planungsverfahren sind besonders dadurch bedingt, daß die Analyse des logischen Ablaufes meistens eng mit der Vorausbestimmung der für die Teilvorgänge erforderlichen Zeiten verknüpft ist. Planung schloß fast immer Zeitplanung ein.[1] Bei der Netzwerkplanung wird hingegen zwischen

Strukturanalyse (planning phase)

und Zeitanalyse (scheduling phase)

des jeweiligen Projektes unterschieden.[2]

Die Strukturanalyse erfolgt bei CPM und PERT in der gleichen Weise durch eine aus der Elektrotechnik bekannte Netzwerkdarstellung. Es kann deshalb im nächsten Abschnitt die Strukturanalyse für beide Methoden gemeinsam behandelt werden. Die Zeitanalyse ist in beiden Verfahren jedoch unterschiedlich, so daß hier eine getrennte Darstellung erforderlich wird.

Um den komplexen Projektablauf und die logisch bzw. technologisch bedingte Folge der einzelnen Arbeitsaufgaben zu beschreiben, wird bei der Strukturanalyse die graphische Darstellungsform des Netzwerkdiagrammes verwandt. Ein Netzwerk (Graph) besteht aus

---

1) Vergl. Remington Rand: Planung mit PERT und CPM, Univac Mitteilungen Nr. 233o23164, Frankfurt a.M., 1964, S.6

2) Vergl. General Electric Computer Department GE - 225: Application Critical Path Method Program, Phoenix, Arizona 1962, S.4: "Characteristic of the network model method is its recognition that planning and scheduling are distinct activities. Planning, exemplified in the preparation of the arrow diagram is the act of stating what activities must occur in a project and in what order they must take place, whereas scheduling, implemented in preceding steps B. through E. is the act of producing project timetables in considertation of the plan and costs".

einer Anzahl von Punkten (Knoten), die miteinander durch Pfeile verbunden sind. "Gerichtete Graphen" - wie sie den von PERT und CPM benutzten Netzwerken zugrunde liegen - haben:

1. einen einheitlichen Anfangspunkt
2. verzweigen sich in Form gerichteter Pfeile
3. enden in einem gemeinsamen Schlußpunkt[1].

Man kann diese Netzwerke deshalb auch als Ablauf- oder Flußdiagramme bezeichnen[2].

121 Netzwerkelemente

Jedes Netzwerk besteht aus zwei Elementen. In Anlehnung an die amerikanische Literatur bezeichnen wir diese als Aktivitäten (activities) und Ereignisse (events).

1211 Ereignis

12111 Normales Ereignis

Ereignisse sind Knotenpunkte im Netzwerk und geben bestimmte Situationen in der Projektdurchführung wieder. Ein Ereignis ist ein Zeitpunkt, somit ohne zeitliche Ausdehnung. Es zeigt den Beginn und/oder den Abschluß einer oder mehrerer Aktivitäten. Durch ein Ereignis wird lediglich ein Zustand und nicht ein Vorgang festgelegt. "They are points in time, which may reflect only that a decision has to be made."[3]
Die Ereignisse werden im Netzwerk durch Kreise oder Ovale dargestellt.[4] Nachdem sie in eine ihrem tech-

---

1) Vergl. Ford, L.R. und Fulkerson, D.R.: Flows in Networks, Princetown 1962

2) Vergl. Dean, K.L.: a.a.O., S. A - 4

3) IBM - Sonderdruck: General Information Manual PERT .... a dynamic project planning and control method, New York, o. J., S. 4

4) Vergl. Dean, K.L.: Managers PERT Manual, Sonderdruck der Remington Rand Univac, St. Paul, Minnesota 1961, S. 4 f.

nologischen Zusammenhang entsprechende Reihenfolge gebracht worden sind, werden sie - vom Ursprung (0) beginnend - fortlaufend numeriert. Sie können darüber hinaus, wie bei der Darstellung im ereignisorientierten Netzwerk, mit Schlüsselwörtern benannt werden.[1] (s. Abb. 4).

Abb. 4

12112 Meilensteine

Meilensteine sind Ereignisse, denen im Projektablauf eine besondere Bedeutung zukommt. Entweder handelt es sich um von außen vorgegebene Zeitpunkte, zu welchen ein bestimmter Projektfortschritt erreicht sein soll, oder der Meilenstein zeigt an, daß ein größerer Projektabschnitt beendet ist und ein neuer beginnen kann.[2] Sie sind auch oft Verbindungspunkte (Interface Events) zwischen größeren zusammengesetzten Netzen.[3] Meilensteine werden im Netzwerk besonders gekennzeichnet (z.B. durch ein Recht- oder Sechseck) und durch Zusatzaktivitäten (milestone restraints) direkt mit dem

---

1) Vergl. IBM - Sonderdruck: General Information Manual PERT ...., a.a.O., S. 4

2) Über die Bedeutung der Meilensteine s. ausführlich: GE - 225 Application, a.a.O., S. 51 ff. und Christensen B, Network Models for Project scheduling, Sonderdruck des General Electric Computer Department, Phoenix Arizona 1962, S, 22 ff.

3) Vergl. IBM - Application Program Bulletin, IBM 7o9o PERT Cost Program, New York 1962, S. 4; über zusammengesetzte Netzwerke s. Nasa, PERT and Companion Cost System, Washington, D.C. 1962

Beginn und Ende des Projektes verbunden (s. Abb. 5).

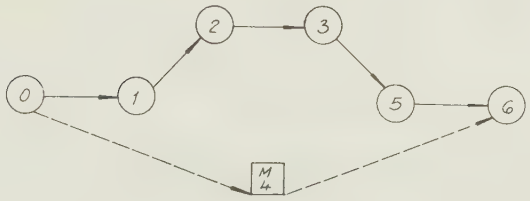


Abb. 5

1212 Aktivität

12121 Normale Aktivität

Eine Aktivität verbindet zwei Ereignisse und wird durch diese in seiner zeitlichen Ausdehnung bestimmt. Die Aktivitäten sind "jene Elemente des Netzwerkes, die im zeitlichen Ablauf die Aufgabe der Vollendung näher bringen."[1] Sie erfordern Produktionsfaktoren und verursachen dadurch Kosten.[2] Aktivitäten können z.B. Planungs-, Prüfungs-, Beschaffungs- oder Produktionsvorgänge sein.

Eine Aktivität wird im Netzwerk durch einen Pfeil dargestellt, dessen Richtung den Ablauf der Tätigkeit in der Zeit wiedergibt. Dieser stellt jedoch keinen Vektor dar, da die Länge des Pfeiles nicht der zeitlichen Ausdehnung der Aktivität entspricht. Werden zwei aufeinanderfolgende Ereignisse mit i und j bezeichnet, dann

1) Daniels, H.J.: Moderne Verfahren in der betrieblichen Planung, in: Betriebswirtschaftsmagazin 1963, S. 747

2) Vergl. IBM General Information Manual PERT ...., a.a.O., S. 6: Activities, therefore represent work - events represent specific accomplishments that are the result of work.

ist die Aktivität, die von i zu j führt, durch (i,j) bestimmt.

Abb. 6

Da eine Aktivität Zeit beansprucht, gilt – wenn y_{ij} die Dauer der Aktivität (i,j) ist – die Nichtnegativitätsgleichung

$$y_{i,j} \geq 0$$

Weiterhin ist $i < j$, da keine Aktivität beginnen kann, bevor die vorhergehende nicht abgeschlossen ist.

12122 Blindaktivität

Blindaktivitäten (Scheinaktivitäten) dienen dazu, den logischen Zusammenhang im Netzwerk zu wahren. Diese fiktiven Aktivitäten werden durch eine gestrichelte Linie dargestellt und ihre zeitliche Ausdehnung ist

$$y_{ij} = o$$

Werden z.B. die Ereignisse 1 und 2 durch zwei Aktivitätspfeile A und B verbunden (konkurrierende Aktivität), so ist dieses Bild nicht eindeutig, da das

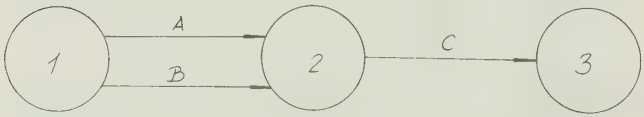
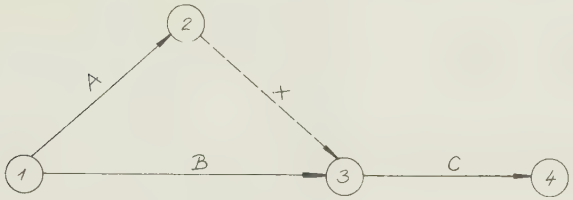


Abb 7

Ereignispaar (1,2) sowohl A als auch B zeitlich begrenzt. Wird eine Scheinaktivität (x) eingeführt, so ergibt sich:



oder

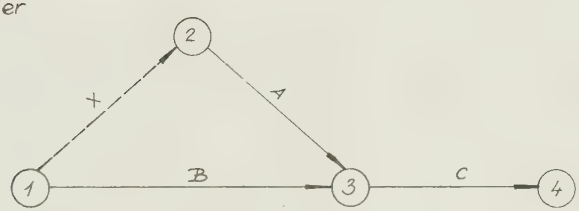
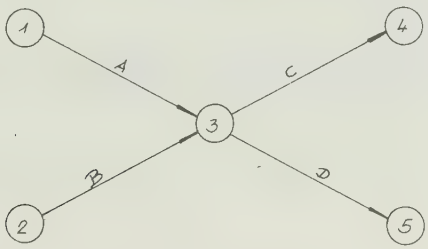


Abb. 8

Aus dieser Darstellungsform ist klar ersichtlich, daß die Aktivitäten A und B unabhängig voneinander verlaufen, für den Beginn von C jedoch beide beendet sein müssen.

Eine Unterscheidung von abhängigen und unabhängigen Aktivitäten (dependent and independent activities) ist gleichfalls und mit Hilfe von Scheinaktivitäten möglich. Soll z.B. graphisch dargestellt werden, daß der Beginn der Tätigkeit D die Fertigstellung der Aufgabe A voraussetzt, der Beginn von C jedoch die von A und B, so ist folgende Darstellung falsch,



da dies bedeuten würde, daß die Aktivitäten A und B beendet sein müßten, bevor sowohl C als auch D beginnen können. Richtig ist die Darstellung in Abb. 1o mit Hilfe einer Scheinaktivität (x).

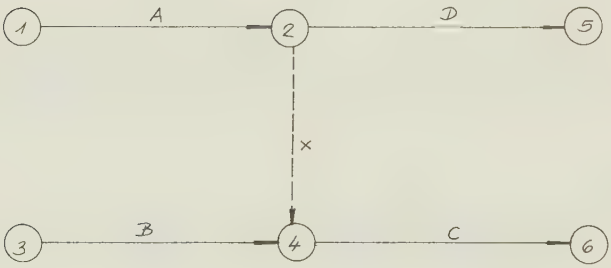


Abb. 10

12123 Untergliederte Aktivität

Da jede Aktivität im Netzwerk beendet sein muß, bevor die folgende beginnen kann, ist es vielfach bei der Konstruktion eines Netzwerkes sinnvoll, zusammengesetzte Aktivitäten (composite activities) zu untergliedern. Durch eine entsprechende Feinplanung wird berücksichtigt, daß in der Praxis einige Folgeaktivitäten bereits beginnen können, bevor die zusammengesetzte Aktivität beendet ist.[1] Hängt z.B. der Beginn der Aktivitäten C, D und B von einem unterschiedlichen Fertigstellungsgrad der Aktivität A ab, so ist A ent-

1) Vergl. Kelley, Jr.J.E., Critical-path planning and scheduling: Mathematical basis, in Operations Research 9 (1961), Nr. 3, S. 296 - 32o

sprechend in Teilaktivitäten zu untergliedern.

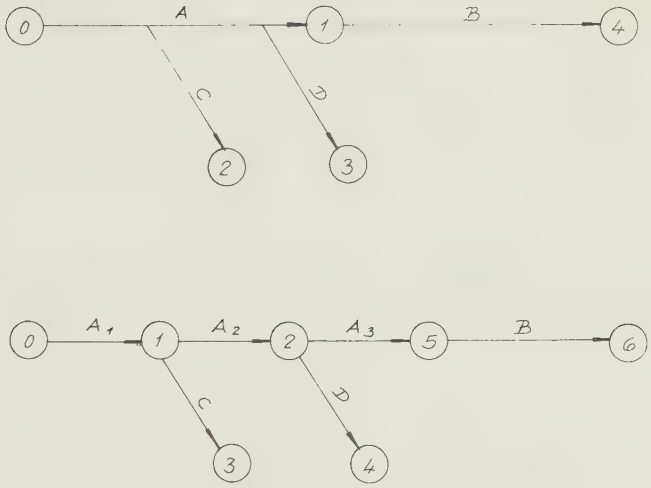


Abb. 11

12124 Zusammenfassung von Aktivitäten

Auch der umgekehrte Vorgang – die Zusammenfassung von Aktivitäten in der Netzwerkdarstellung – kann sinnvoll sein. So kann ein großes, komplexes Netzwerk durch Aufgliederung des Gesamtprojektes in kleinere "Unterprojekte" (sub-networks) übersichtlicher werden. Die einzelnen "Unterprojekte" werden dann im Hauptnetzwerk durch eine Sammelaktivität (summary activity) dargestellt.

Großprojekte sind solange aufzugliedern, bis die Unternetzwerke zu übersichtlichen Planungs- und

Kontrollinstrumenten werden.[1] Eine Zusammenfassung von Aktivitäten ist besonders sinnvoll, wenn mehrere Aktivitäten technologisch eng miteinander verknüpft sind und von einem Ereignis ausgehen und in einem anderen enden. (s. Abb. 12)

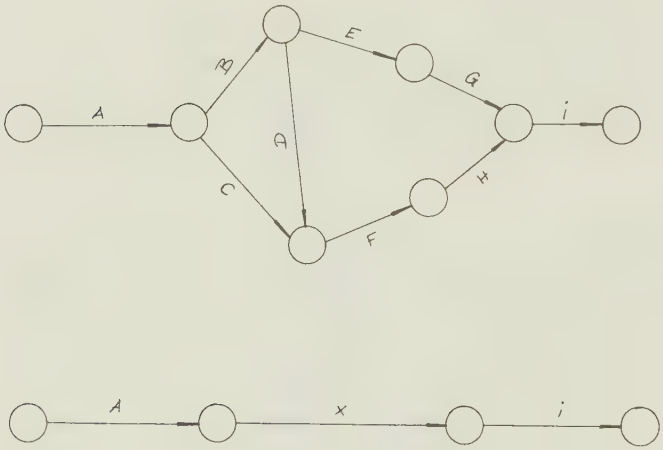


Abb. 12

12125 Anlaufzeitaktivitäten

Anlaufzeitaktivitäten (lead-time activities) berücksichtigen die Zeitspanne, die zwischen geplantem Beginn und effektiven Projektbeginn liegt. Sie werden meist durch eine Wellenlinie dargestellt und in dieser Zeit

1) Vergl. Office of the Secretary of Defence and National Aeronautics and Space Administration: DOD and NASA guid PERT cost system design, Washington 1962, S. 27

werden die erforderlichen Vorbereitungs- und Verwaltungsarbeiten erledigt.[1]

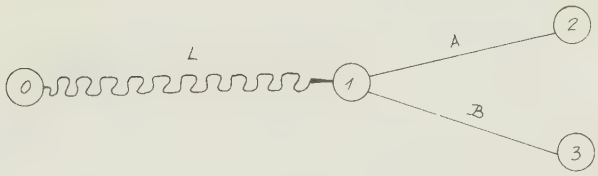


Abb. 13

Die Anlaufzeitaktivität ist auch im Zusammenhang mit den zeitlichen Beschränkungen von Bedeutung.

12126 Zeitliche Beschränkungen

Zeitliche Beschränkungen (restraints) wie Kreditbewilligungen, Baugenehmigungen oder die Anlieferung von knappen Materialien beginnen im Zeitpunkt (0) der Anlaufzeitaktivität.[2]

---

1) Vergl. Christensen, B.: a.a.O., S. 24, siehe hierzu auch Weber, K., Planung mit der "Critical Path Method" in: Industrielle Organisation", 1963, Nr. 1, S. 3

2) Vergl. GE - 225 Application ...., a.a.O., S. 51: "The effect of a restraint arrow emanating from the tail of the lead time arrow is that the lead time can then be considered as a buffer between the time the project should start without restraints and the time it can start with the restraints."

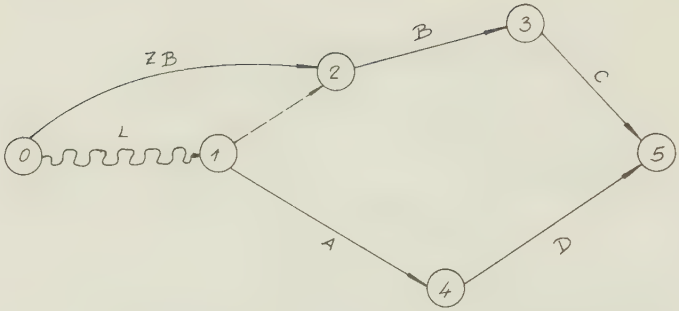


Abb. 14

Diese Aktivitäten unterscheiden sich von den bisher beschriebenen dadurch, daß sie die Unternehmensleitung nicht unmittelbar beeinflussen kann.

122 Arten der Netzwerkdarstellung

1221 Das ereignisorientierte Netzwerk

Im ereignisorientierten Netzwerk werden nur die Teilergebnisse des Projektes in Form von Ereignissen gezeigt. Die Aktivitäten hingegen, die die Tätigkeiten darstellen, bleiben unberücksichtigt. Diese Form der Darstellung wurde vielfach für PERT-Netzwerke benutzt. (s. Abb.15)[1]

1) Vergl. Dean, K.L.,: Fundamentals ...., a.a.O., S. 13 ff, ebenso Abb. 16 und 17

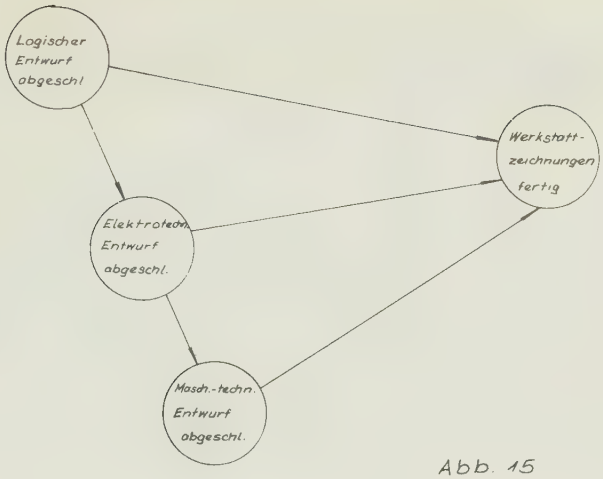


Abb. 15

Ein großer Mangel des ereignisorientierten Netzwerkes liegt darin, daß nicht ersichtlich ist, welche Vorgänge zwischen den einzelnen Ereignissen liegen.

1222 Das aktivitätsorientierte Netzwerk

In der von CPM verwandten aktivitätsorientierten Netzwerkdarstellung wird hingegen nur die Tätigkeit beschrieben und auf die Bezeichnung der Ereignisse völlig verzichtet.[1] (s. Abb. 16)

1) Vergl. Dean, K.L.: Manager's Pert Manual, a.a.O. S. 14: Nach Dean "the activity oriented network lends itself to the development of a more logical and dearly defined net and more realistic time estimates."

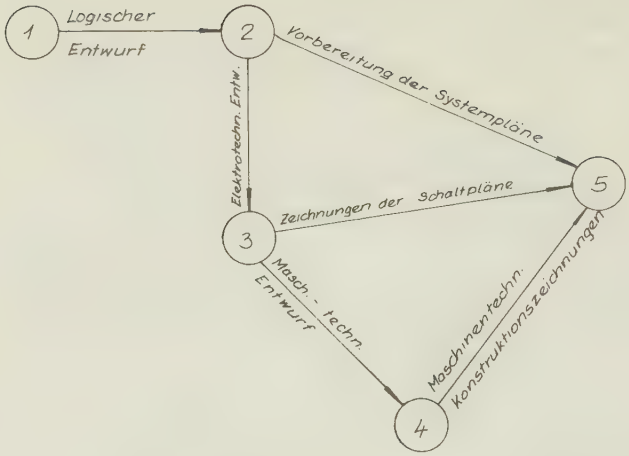


Abb. 16

1223 Das aktivitätsorientierte Netzwerk in der ereignisbezogenen Form

Aktivitätsorientierte Netzwerke in der ereignisbezogenen Form geben eine eindeutige Beschreibung des Projektablaufes, da jede Aktivität durch einen einzigen Pfeil klar bestimmt ist. Dadurch, daß die Ereignisse bezeichnet werden, ist eine bessere Übersicht über die Zusammenhänge im Netzwerk gegeben. Diese Form der Darstellung wird sowohl bei neueren PERT- als auch CPM-Untersuchungen verwandt.

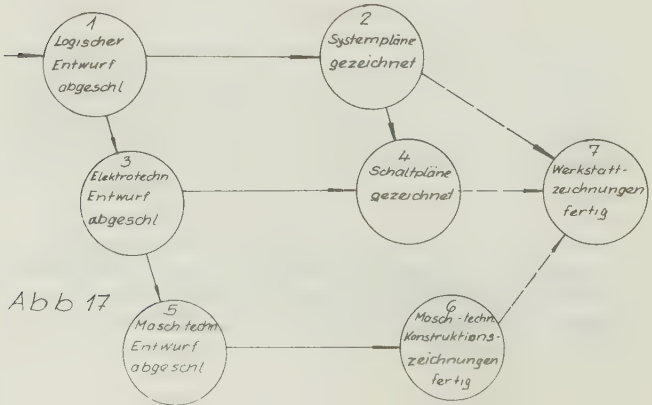


Abb 17

Ereignis 7 ist lediglich eine Zusammenfassung der Ereignisse 2, 4 und 6. Da diese zu unterschiedlichen Zeiten beendet sein können, sind die Blindaktivitäten (2, 7), (4, 7) und (6, 7) erforderlich.

123 Regeln für das Aufstellen von Netzwerken

Eine erfolgreiche Anwendung der Netzwerkplanung erfordert eine genaue Darstellung des Projektes in einem logisch geordneten Netzwerk. Bei der Konstruktion eines Netzwerkes sind deshalb bestimmte Regeln und Abmachungen zu berücksichtigen. Wie bei den herkömmlichen Planungsmethoden ist zunächst das Projektziel und eine genaue Arbeits- und Ablaufanalyse des Projektes festzulegen. Diese Analyse legt die technischen Zusammenhänge und die Folge der Aktivitäten fest. Beim Entwurf des Netzwerkes kann man entweder vom Projektbeginn bis zur Fertigstellung oder den umgekehrten Weg gehen. Hierfür lassen sich keine festen Regeln aufstellen. Sowohl die Erfahrung des Planers als auch die Art des Projektes können diese Entscheidung beeinflussen. In der Literatur wird meist vorgeschlagen, vom Schlußereignis rückwärts aufzubauen, da es einfacher ist, "alle Vorgänge zu erfassen, die einer Aktivität vorausgehen, als alle möglichen Folgen zu bestimmen, die der Abschluß eines Einzelvorganges im Rahmen eines umfassenden Projektes haben kann."[1] Wichtig ist, daß man bei der Aufstellung des Netzes für jede Aktivität feststellt:

1. Welcher Vorgang kommt unmittelbar vorher zur Ausführung?
2. Welcher Vorgang folgt unmittelbar nachher?
3. Welcher Vorgang könnte gleichzeitig durchgeführt werden?

Bei umfangreichen Netzwerken kann man zunächst "zusammengesetzte Aktivitäten" verwenden. Zu beachten ist weiterhin:

1. Jede Aktivität muß in einem Ereignis beginnen und in einem nachfolgenden enden.
2. Zwei Ereignisse dürfen nur durch eine Aktivität verbunden werden.

---

1) Univac-Mitteilungen.., a.a.O. S. 14, sowie Dean, K.L.: Fundamentals, a.a.O. S. 15

3. Die Länge der Pfeile gibt nicht die Dauer der Aktivität an.

4. Alle Tätigkeiten sind genau zu beschreiben und so zu bezeichnen, daß die Bedingung $i < j$ eingehalten wird.

5. Im CPM und PERT-Netzwerk dürfen - im Gegensatz zur Potentialmethode - keine Schleifen vorkommen, d. h., nach rückwärts laufende Aktivitäten sind nicht möglich.

6. Bei der Konstruktion des Netzwerkes ist jeweils ein Weg vom Start zum Schluß (oder umgekehrt) zu verfolgen, dann erst der nächste.

13 Zeitanalyse - mathematische Grundlagen

Die graphische Darstellung des Projektablaufes durch ein Netzwerkdiagramm (Strukturanalyse) ist die erste Phase der Netzwerkplanung. In der zweiten Phase (Zeitanalyse) wird die zeitliche Ausdehnung der Aktivitäten festgelegt, und die Gesamtdauer des Projektes bestimmt. Aus dem reinen Ablaufplan erhält man so durch Einbeziehung der Zeit einen Zeitplan. Die Ermittlungen oder Schätzungen über die Dauer der Aktivitäten bilden sowohl bei CPM als auch bei PERT die Grundlage der Zeitanalyse. Ziel der Zeitanalyse ist es hiernach:

1. Frühest- und spätestmögliche Anfangs- und Endtermine für die einzelnen Aktivitäten im voraus zu bestimmen.

2. Aus diesen mögliche "Schlupfzeiten" zu errechnen.

3. Kritische Stellen innerhalb der Gesamtplanung festzustellen. Kritisch ist hierbei eine Aktivität dann, wenn sich ihre Verzögerung auf den nachfolgenden Zeitablauf auswirkt, und dadurch die gesamte Zeitplanung in Frage gestellt wird.

4. Ein reibungsloses Ineinandergreifen der einzelnen Arbeitsaufgaben zu ermöglichen.

5. Daten zu ermitteln, mit denen der Einsatz von Arbeitskräften, Maschinen und Material gesteuert und überwacht werden kann.[1]

131 Zeitanalyse bei CPM

Ihrem Charakter nach ist die Dauer einer Aktivität eine stochastische Variable mit einer annährungsweise bekannten Wahrscheinlichkeitsverteilung. "Die Dauer gilt als "bestimmt" (deterministic), wenn die Varianz der Verteilung relativ klein ist, andernfalls gilt sie als "unbestimmt" (nondeterministic)."[2]

Obwohl diese Annahme logisch nicht konsequent ist, wird sie dennoch den praktischen Erfordernissen gerecht, da bei vielen Projekten die zeitlichen Abweichungen von den Durchschnittswerten gering sind und deshalb eine Berücksichtigung von Unsicherheitsfaktoren in den Berechnungen wirtschaftlich und sachlich nicht erforderlich ist. In diesen Fällen werden die Durchschnittswerte zu sicheren Zeiterwartungen für die Zukunft. Diese Annahme wird bei CPM gemacht, während PERT von unbestimmten Zeiterwartungen ausgeht.[3] Die Anwendung von CPM ist deshalb bei den Projekten sinnvoll, wo relativ sichere Zeitannahmen über die Dauer der Aktivitäten auf der Grundlage von Vergangenheitswerten gemacht werden können.

1) Vergl. Wagner, G.: PERT und CPM als Planungsinstrumente der Bauindustrie, in: Der Baubetriebsberater Nr. 8, 1963, S. 1194

2) Univac-Mitteilungen, a.a.O., S. 16

3) Über die Verwendung von CPM bei unsicheren Zeiterwartungen siehe: Kelley und Walker: Critical Path Planning and Scheduling, a.a.O., S. 163 f

1311 Bestimmung der einzelnen Aktivitätszeiten

13111 Die progressive Methode

Für die Ermittlung der Aktivitätszeiten sind möglichst realistische Annahmen über das zur Anwendung kommende fertigungstechnische Verfahren sowie Art und Zahl der einzusetzenden Produktionsfaktoren zu treffen. "Die Schätzwerte für diese Phase sollten sich auf normale Arbeitszeit, normale Liefertermine und eine typische Anzahl von Arbeitskräften beziehen."[1] In einem Netzwerk muß grundsätzlich an einer Zeiteinheit festgehalten werden. Meist wird in Tagen oder Wochen gerechnet. Legt man Tage als Zeiteinheit zugrunde, dann ist darauf zu achten, daß keine Vermischung zwischen Kalender- und Arbeitstagen vorkommt.

Werden die Ereignisse entsprechend der Bedingungsgleichung $O < i < j < n$ nummeriert, so sind damit auch die Aktivitäten definiert. Das Projekt P mit n + 1 Ereignissen möge hierbei zum relativen Zeitpunkt O starten, und das Schlußereignis erhält den Index n. Die Zeitpunkte, in denen die Ereignisse i und j eintreten, sind t_i und t_j . Die Dauer der Aktivität (i,j) ist Y_{ij}, so daß folgender Zusammenhang besteht:

$$t_i + Y_{ij} \leq t_j$$

oder

$$Y_{ij} + t_i - t_j \leq O$$

Bezogen auf den Start des Projektes gibt es für das Eintreten jedes Ereignisses einen frühestmöglichen Zeitpunkt. Da zu einem Ereignis j mehrere Folgen von Aktivitäten führen können, ist für das Ereignis j dieser frühestmögliche Zeitpunkt $t_j^{(o)}$ durch den zeitlängsten Weg bestimmt, der zu diesem Ereignis führt.

Der zeitlängste Weg ist hierbei jeweils die größte Summe der Aktivitätszeiten auf den Wegen, die vom Ursprung zum Ereignis führen. Ist $t_i^{(o)}$ die frühestmögliche Startzeit der Aktivität $Y_{i,j}$, so ist der frühestmögliche Abschluß der Aktivität Y_{ij} $t_i^{(o)} + Y_{i,j}$.

---

1) Krüger, K.: Optimale Projekts-Fortschritt-Planung, Berlin-Köln-Frankfurt/M 1962, S. 9

Gibt es keinen längeren Weg zum Ereignis j, als den über die Aktivität $Y_{i,j}$, dann ist der frühestmögliche Abschluß der Aktivität $Y_{i,j}$ gleichzeitig die frühestmögliche Eintreffzeit des Ereignisses j. (Abb. 18)

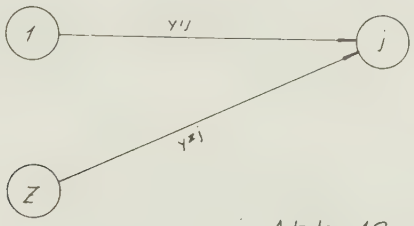


Abb. 18

Wenn also

$$t_i^{(o)} + Y_{i,j} \geq t_z^{(o)} + Y_{z,j} ,$$

dann ist auch

$$t_i^{(o)} + Y_{i,j} = t_j^{(o)} ,$$

Für die Bestimmung von $t_j^{(o)}$ gilt dann allgemein:

$$t^{(o)} = 0$$

$$t_j^{o}(o) = \max_{(i,j)\,\varepsilon P} (t_i^{(o)} + Y_{i,j})$$

für $1 \leq j \leq n$,

wobei die Schreibweise $(i,j)\,\varepsilon P$ bedeutet, daß die Aktivität (i,j) ein Element des betreffenden Projektes sein muß, und i diejenigen Ereignisse sind, die das Ereignis j durch eine Aktivität verbinden. Der Wert für den frühestmöglichen Abschluß der Aktivität $Y_{i,j}$ ist somit zunächst lediglich Auswahlkriterium zur Bestimmung des zeitlängsten Weges zum Ereignis j.

Für den frühestmöglichen Abschluß des Gesamtprojektes folgt

$$t_n^{(o)} = \max_{(j,n)\ \varepsilon P} (t_j^{(o)} + Y_{j,n}) .$$

Diese so errechnete frühestmögliche Abschlußzeit $t_n^{(o)}$ kann mit der gewünschten Projekt-Abschlußzeit λ verglichen werden. Ist

$$\lambda < t_n^{(o)} ,$$

so kann man das Projekt unter den angenommenen Voraussetzungen (Arbeitsverfahren, Zahl der Produktionsfaktoren) nicht durchführen, und es sind Umdispositionen erforderlich.

13112 Die retrograde Methode

Vom frühestmöglichen Abschluß $t_n^{(o)}$, der durch Addition der Aktivitäten auf dem zeitlängsten Weg bestimmt worden war, können rückwärts rechnend (retrograde Methode) für die einzelnen Ereignisse die spätesterlaubten Zeitpunkte $t_i^{(1)}$ festgelegt werden. Diese zeigen an, daß bei ihrer zeitlichen Überschreitung der errechnete Endtermin $t_n^{(o)}$ nicht mehr eingehalten werden kann, weil es dadurch zu zeitlichen Verschiebungen innerhalb der Gesamtplanung kommt. Subtrahiert man von der Gesamtprojektdauer die Summe der Aktivitätszeiten des zeitlängsten Weges, der vom Ereignis zum Ziel führt, so erhält man die spätestmöglichen Zeiten der jeweiligen Ereignisse.

Es gilt:

$t_n^{(1)} = \lambda$ (spätestmöglicher Termin zur Erreichung des Gesamtzieles = Gesamtdauer)

$$t_i^{(1)} = \min_{(i,j) \in P} \left(t_j^{(1)} - Y_{i,j} \right)$$

für $O \leq i < n$.

Nachfolgendes Beispiel (s. Abb. 19) soll die bisherigen Ausführungen veranschaulichen.

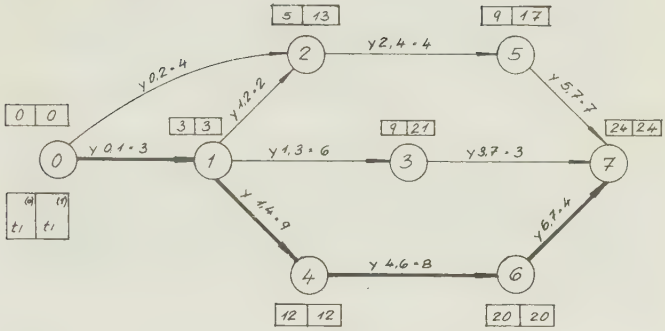


Abb. 19

Die Dauer des Projektes $t_n^{(o)}$ ergibt sich durch Addition des zeitlängsten Weges (3 + 9 + 8 + 4 = 24), der über die Ereignisse O, 1, 4, 6 zu 7 führt. Setzt man $t_n^{(o)} = \lambda = t_n^{(1)}$, so erhält man von hier ausgehend durch retrograde Zeitrechnung für die einzelnen Ereignisse die im zweiten Kasten angegebenen $t_i^{(1)}$-Werte. So ergibt sich z. B. für Ereignis 3 ein spätestmöglicher Zeitwert von 24 - 3 = 21. Zum Ereignis 1 führen vom Terminus drei Wege. Der zeitlängste ist hierbei für die Bestimmung von $t_1^{(1)}$ zu wählen. Dieser führt über die Ereignisse 7, 6, 4 und es folgt für $t_1^{(1)} = 24 - 4 - 8 - 9 = 3$.

Der $t_2^{(o)}$-Wert (5) für Ereignis 2 ist durch Addition der Wege (O,1) und (1,2), die den zeitlängsten Weg zum Ereignis 2 bilden, bestimmt. Für die Ereignisse O, 1, 4, 6, 7 - über die der zeitlängste Weg durch das Netz zum Schlußereignis führt ist

$$t_i^{(o)} = t_i^{(1)} \text{ und } t_j^{(o)} = t_j^{(1)}.$$

Zusammenfassend lassen sich für die frühest- und spätestmöglichen Ereigniszeitpunkte der einzelnen Aktivitäten folgende Bezeichnungen aufstellen: (s. Abb. 20).

Frühestmöglicher Beginn: $t_i^{(o)}$

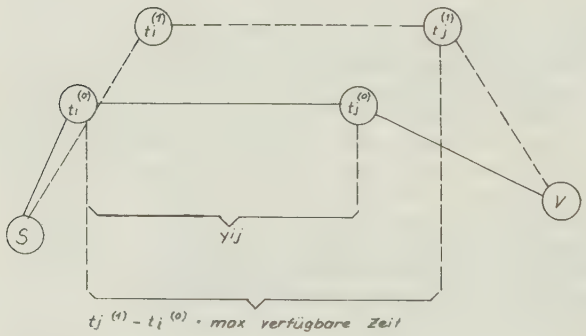
Frühestmöglicher Abschluß: $t_i^{(o)} + Y_{i,j} = t_j^{(o)}$

Spätestmöglicher Beginn: $t_j^{(1)} - Y_{i,j} = t_i^{(1)}$

Spätestmöglicher Abschluß: $t_j^{(1)}$

Enden alle dem Ereignis i vorausgehenden Aktivitäten, die auf dem jeweils zeitlängsten Weg liegen, zum frühestmöglichen Termin und beginnen alle dem Ereignis i folgenden Aktivitäten zum spätesterlaubten Startzeitpunkt, so ist die maximal verfügbare Zeit für die Aktivität $Y_{i,j}$ $t_j^{(1)} - t_i^{(o)}$.

Abb. 20



1312 Bedeutung und Arten des Schlupfes

Ist die maximal verfügbare Zeit ($t_j^{(1)} - t_i^{(o)}$) einer Aktivität größer als ihre Dauer, so bezeichnet man diese als Schlupfaktivität (floater). Schlupfaktivitäten können in einem gewissen Umfang zeitlich verschoben oder verzögert werden, ohne den Abschlußtermin des Gesamtprojektes zu beeinflussen. Die Veränderungsmöglichkeiten der zeitlichen Lage von $Y_{i,j}$ bzw. deren evtl. Ausdehnung zwischen $t_i^{(o)}$ und $t_j^{(1)}$ ist durch die

frühest- und spätestmöglichen Anfangs- und Schlußzeiten der Aktivitäten bestimmt. Wirtschaftlich bedeuten die Schlupfzeiten nicht ausgelastete Produktionsfaktoren, die bis zu einer gewissen Sicherheitsgrenze anderweitig eingesetzt werden können. Folgende vier Arten des Schlupfes können unterschieden werden:

Gesamtschlupf $(Sg) = t_j^{(1)} - t_i^{(o)} - Y_{i,j}$

Freier Schlupf $(Sf) = t_j^{(o)} - t_i^{(o)} - Y_{i,j}$

Unabhängiger Schlupf $(Su) = t_j^{(o)} - t_i^{(1)} - Y_{i,j}$

Interferierender Schlupf $(Si) = t_j^{(1)} - t_j^{(o)}$.

Den Schlupfwerten kommt ein unterschiedlicher Aussagewert zu. Der Gesamtschlupf einer Aktivität ist die maximal verfügbare Zeit abzüglich der jeweiligen Aktivitätsdauer. Ist die tatsächliche Dauer der Aktivität $Y_{i,j}$ gleich der geschätzten, sind alle vor i liegenden Aktivitäten frühestmöglich beendet und werden alle nach j liegenden Aktivitäten zum spätestmöglichen Zeitpunkt begonnen, so zeigt der Gesamtschlupf das Zeitintervall an, in dem die Aktivität verschoben werden kann, ohne daß die Gesamtdauer des Projektes beeinflußt wird.

Den freien Schlupf erhält man, wenn alle Aktivitäten der gleichen Folge so früh wie möglich beginnen.

Um den unabhängigen Schlupf kann eine Aktivität verzögert werden, ohne daß die anderen Bedingungen unterliegen (lediglich die geplante Dauer der Aktivitäten muß eingehalten werden).

Der bedingt verfügbare (interferierende) Schlupf ist die Differenz zwischen Gesamtschlupf und freiem Schlupf. Es wird hierdurch die Spanne angegeben, um welche ein Ereignis höchstens verschiebbar ist (entspricht dem "Slack" der PERT-Methode). Schaubild 21 soll diese Zusammenhänge verdeutlichen.[1)]

---

1) entnommen aus: Wagner, G., PERT und CPM als Planungsinstrumente zur Abstimmung komplexer Abläufe und Vorgänge, in: Die Lochkarte, Heft 191, 27. Jg., S. 17

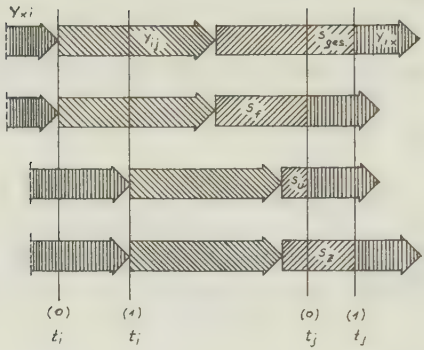


Abb. 21

1313 Schlupfzeitpräferenzen

Obwohl bei CPM im Gegensatz zu PERT die Dauer der Aktivitäten "bestimmt" (deterministic) ist, kann dennoch durch Verteilung des Schlupfes bei nicht kritischen Aktivitäten berücksichtigt werden, daß die Unsicherheit der Schätzung für die Zeitdauer der einzelnen Aktivitäten unterschiedlich ist. Durch Gewichtung der Unsicherheit wird hierbei der frei verfügbare Schlupf auf die einzelnen Aktivitäten entsprechend ihrer Eintreffwahrscheinlichkeit verteilt. Muß man mit Soll-Ist-Abweichungen rechnen, so werden entsprechende "Schlupfzeitpräferenzen" vorgegeben. Liegt z.B. folgender Netzwerkausschnitt vor (Abb. 22), so hat die Aktivität $Y_{8,11}$ einen frei verfügbaren Schlupf von 2o Zeiteinheiten, wobei zu beachten ist, daß die Aktivität $Y_{7,8}$ keinen frei verfügbaren Schlupf hat, da

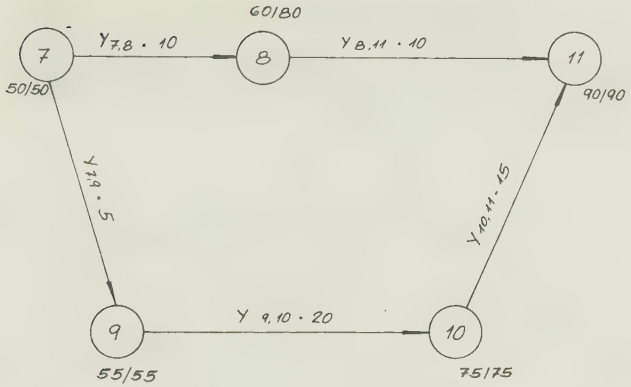


Abb. 22

dieser nur an "Konjunktionspunkten" nichtkritischer Netzwerkstrecken entsteht.[1)]

Ist die Zeitschätzung für die Dauer der Aktivität $Y_{7,8}$ ein Erfahrungswert, bei dem mit Abweichungen kaum zu rechnen ist, hingegen die Dauer der Aktivität $Y_{8,11}$ unsicher, so kann der frei verfügbare Schlupf von 2o Zeiteinheiten, z.B. im Verhältnis 1 : 4 auf die Aktivitäten $Y_{7,8}$ und $Y_{8,11}$ aufgeteilt werden. Die Aktivität $Y_{8,11}$ erhält gegenüber der Aktivität $Y_{7,8}$ eine Pufferzeitpräferenz von 12 Zeiteinheiten (16 - 4), und das Ergebnis 8 bekommt einen festen Vorgabewert von 64 Zeiteinheiten, so daß auch alle nichtkritischen Ereignisse Festwertcharakter erhalten.[2)]

---

1) Vergl. Weber, K.: Planung mit CPM und PERT, in: Industrielle Organisation, Nr.6, 1964, S. 232 ff. Hier wird eine Formel zur Bestimmung der Vorgabetermine wiedergegeben, die vom General Electric Computer Department entwickelt wurde.

2) Vergl.: GE - 225 Application, a.a.O., S. 12 und S. 22 sowie Waldron, A.J.: Fundamentals of Project Planning and Control, 2. Aufl., N.J. 1963, S. 56 ff. und S. 96 ff.

1314 Der kritische Weg

Ist die maximal verfügbare Zeit für eine Aktivität gleich ihrer Dauer, somit $t_j^{(1)} - t_i^{(o)} = Y_{i,j}$, so wird diese Aktivität als kritisch bezeichnet. Es ist dann kein Schlupf vorhanden, und frühest- und spätestmögliche Zeitpunkte fallen zusammen.

$$t_i^{(o)} = t_i^{(1)} \qquad t_j^{(o)} = t_j^{(1)}$$

Ist ein vorgegebener Projektabschlußzeitpunkt $\lambda = t_n^{(o)}$, dann hat das Projekt einen oder mehrere kritische Wege (critical path). Dieser kritische Weg ist durch die Folge der Aktivitäten, die auf dem zeitlängsten Weg vom Start zum Schlußereignis liegen, bestimmt. Jede Aktivität auf dem kritischen Weg besitzt kein "Zeitpolster", und zeitliche Verzögerungen in einer Aktivität wirken sich entsprechend auf den Endtermin aus. Da dem kritischen Weg besondere Bedeutung zukommt, wurde das Planungsverfahren (Critical Path Method) auch nach ihm benannt. Die kritischen Stellen sichtbar zu machen und sie der laufenden Kontrolle zu unterziehen, ist eines der Hauptziele der Netzwerkplanung. Besonders vorteilhaft ist hierbei, daß nur etwa 1o % aller Aktivitäten kritisch sind, so daß man die Zielsetzung des "management by exception" berücksichtigen kann.[1)]

Ist der kritische Weg bekannt, so ist damit auch ein sinnvoller Einsatz von zusätzlichen Produktionsfaktoren möglich, um eine Verkürzung der Projektdauer zu erreichen. Plant man hingegen Beschleunigungskosten für nicht kritische Aktivitäten, so würde dies keine Verkürzungen des Gesamtprojektes bewirken, sondern lediglich eine Vergrößerung von Schlupfzeiten zur Folge haben. Im Gegensatz zur Planung mit Balkendiagrammen ist somit bei CPM ein gezielter Einsatz von zusätzlichen Produktionsfaktoren zur Projektbeschleunigung möglich.

---

1) Vergl. Kelley, J.E., Critical Path Planning and Scheduling .... , a.a.O., S. 319

132 Zeitanalyse bei PERT

Während CPM von "bestimmten" (deterministic) Aktivitätszeiten ausgeht, wird bei PERT mit Hilfe der Wahrscheinlichkeitsrechnung das Unsicherheitsmoment der Planung berücksichtigt. Hierzu wird ein stochastisches Modell aufgestellt, das die Grundlage für die Bestimmung der Aktivitätszeiten und deren Eintreffwahrscheinlichkeit ist.
Besonders geeignet ist PERT für Forschungs- und Entwicklungsarbeiten, die mit einer großen Unsicherheit belastet sind.[1)]

1321 Zeitschätzungen für die Aktivitäten

13211 Ermittlung des Erwartungswertes (te)

Die Bestimmung der Erwartungszeit (te) jeder Aktivität beruht auf drei Zeitschätzungen. Die drei zu schätzenden Zeiten sind:[2)]

1. Wahrscheinlichste Zeit (most likely time) = m
2. Günstigste Zeit (optimistic time) = a
3. Ungünstigste Zeit (pessimistic time) = b

Die günstigste- und die ungünstigste Zeit sind Extremwerte, die nur unter besonderen Verhältnissen eintreten und deren Eintreffwahrscheinlichkeit entsprechend gering ist (1 %). Die günstigste Zeit soll so bestimmt werden, daß es selbst bei völlig reibungslosem Ablauf nicht möglich ist, die Aktivität in einer kürzeren Zeit zu beenden. Die ungünstigste Zeit berücksichtigt hingegen denkbare

---

1) Auf die Frage der Berücksichtigung alternativer Möglichkeiten in der Forschung kann hier nicht eingegangen werden. S.hierzu: Eisner, A.: Generalized Network Approach To the Planning and Scheduling of a Research Project. in: Operations Research, Vol. 1o/No. 1, 1962, S. 115 ff.

2) S.hierzu: IBM, PERT ... a dynamic ..., a.a.O., S.7, sowie die PERT-Veröffentlichungen des Department of the Navy, Bureau of Naval Weapons, Special Projects Office, Washington, US Goverment Printing Office.

Fehlschläge und Reibungen im Ablauf. Die wahrscheinlichste Zeit ist die "normale" Zeit, "die am häufigsten erreicht wird, wenn der Vorgang unter gleichen Bedingungen mehrmals wiederholt werden könnte."[1)]

Diese drei Zeitschätzungen geben das zeitliche Intervall an, in welchem die Aktivität beendet wird. Es gilt hierbei:

$$a \leqq m \leqq b$$

Aus diesen drei Zeitschätzungen wird für jede Aktivität die sogenannte Erwartungszeit (te) ermittelt. Hierbei wird unterstellt, daß die Verteilung der drei Zeitwerte durch eine "Beta-Verteilung" angenähert werden kann, was durch empirische Untersuchungen bestätigt wurde.[2)] (Abb. 23)

---

1) Univac Mitteilungen, Planung mit PERT und CPM, a.a.O., S. 21

2) Zur Problematik der Beta-Verteilung kann in diesem Zusammenhang nicht Stellung genommen werden. Es ist hierzu auf die umfangreiche Literatur verwiesen. Darstellungen über die Ableitung der Beta-Verteilung bei:
Breitenberger, E.: Development projects as stochastic Process., Dahlgren 1959 C.
Clarke, R.W.: An Introduction to crical path analysis, Standford 1961
Grubbs, E.F.: Attempts to validate certain PERT statistics or "picking on PERT", in: Operations-Research 1o (1962), No. 6, S. 912 - 915.
Kritisch zur Beta-Verteilung:
Mac Crimmon, K.R., Ryavec, Ch.A., An Analytical Study of the PERT Assumtions, in: Journal of Operations Research, Vol. 12 (1964), No. 1, S. 16 ff. sowie Department of the Navy, Bureau of Naval Weapons, Special Project Office: Proceedings of the PERT coordination task group meeting. Washington 196o, S. 11

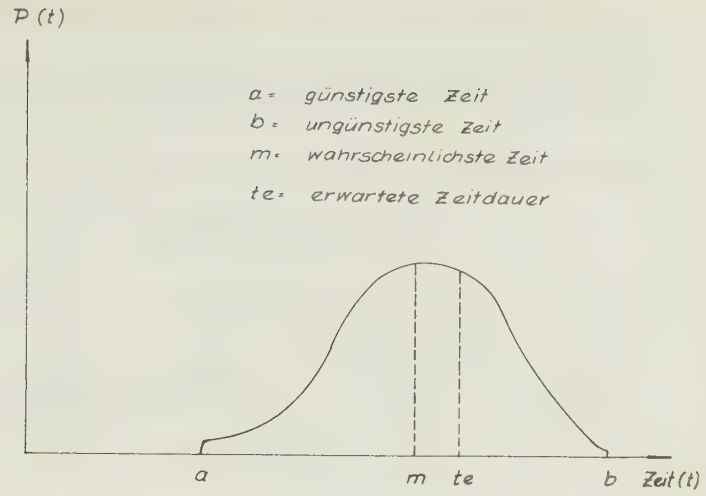


Abb. 23

Die Ausgangsgleichung dieser Wahrscheinlichkeitsverteilung hat die Form:[1]

$$B\ (p,q,x)\ dx = \frac{1}{ß(p,q)}\ x^{p-1}\ (1-x)^{q-1}\ dx,$$

für $0 < x < 1$

wobei ß (p,q) die Beta-Funktion darstellt und

$$ß\ (p,q) = \int_0^1 x^{p-1}\ (1-x)^{q-1}\ dx = \frac{\Gamma(p)\,\Gamma(q)}{\Gamma(p+q)}$$

1) Vergl. Fisz, M.: Wahrscheinlichkeitsberechnung und mathematische Statistik., 2. Aufl., Berlin 1962, S. 137 - 138. Die Ableitung der ß-Funktion erfolgt in Anlehnung an Weber, K., a.a.O., S. 38 ff und S. 24o f und Grubbs, F.E.; Attempts to validate certain PERT statistics or "picking on PERT". Operations Research 1o (1962) 6, S. 912 - 915.

das r. Moment ist. Dieses ist bestimmt in bezug auf den Ursprung durch

$$\frac{1}{ß(p,q)} \; x^{r+p-1} (1-x)^{q-1} \; dx = \frac{ß(p+r,q)}{ß(p,q)}$$

Für den Mittelwert (r = 1) ergibt sich somit:

$$\frac{ß(p+1,q)}{ß(p,q)} = \frac{\Gamma(p+1)\,\Gamma(q)\,\Gamma(p+q)}{\Gamma(p+q+1)\,\Gamma(p)\,\Gamma(q)} = \frac{p}{p+q}$$

Für die Streuung (r = 2) erhält man:

$$\frac{ß(p+2,q)}{ß(p,q)} - \left[\frac{p}{(p+q)}\right]^2 = \frac{p(p+1)}{(p+q)(p+q+1)} - \frac{p^2}{(p+q)^2}$$

$$= \frac{pq}{(p+q)^2(p+q+1)}$$

Setzt man - im Anschluß an die amerikanische Literatur - $p - 1 = \alpha$ und $q - 1 = \gamma$, so folgt für den Mittelwert (erstes zentrales Moment):

$$K_1 = \frac{\alpha + 1}{\alpha + \gamma + 2}$$

und für die Varianz

$$K_2 = \frac{(\alpha + 1)\;(\gamma + 1)}{(\alpha + \gamma + 2)^2(\alpha + \gamma + 3)}$$

Die Dichte einer zufälligen Veränderlichen (X) mit einer Beta-Verteilung kann auch in der Form:

$$f(x) = \left[ß\,(\alpha + 1, \gamma + 1)\right]^{-1} x^{\alpha} (1-x)^{\gamma}$$

geschrieben werden.

Setzt man $x = \frac{t-a}{b-a}$ und $\left[ß\,(\alpha + 1, \gamma + 1)\right]^{-1} = N$,

so erhält man die aus der PERT-Literatur bekannte Form:

$f(t) = N\,(t-a)^{\alpha}\;(b-t)^{\gamma}$, wobei a und b die Variationsbreite festlegen und t einen beliebigen intermediären Zeitwert wiedergibt.

Aus $x = \frac{t-a}{b-a}$ folgt $t = a + (b-a)\, x$.

Aus der allgemeinen Formel für K_1 folgt unter Berücksichtigung der Besonderheiten der PERT-Zeitplanung für den Mittelwert (te)

$$te = a + (b-a)\,\frac{(\alpha + 1)}{(\alpha + j + 2)} \quad \text{oder}$$

$$te = \frac{aj + b\alpha + b + a}{\alpha + \gamma + 2}$$

Entsprechend gilt für die Varianz ($\sigma^2 te$):

$$\sigma^2 te = (b-a)^2\,\frac{(\alpha + 1)\,(j + 1)}{(\alpha + j + 2)^2\,(\alpha + j + 3)}$$

Setzt man für $f'(t) = 0$, so hat man für den Modus

$$m = \frac{aj + b\alpha}{\alpha + j}$$

und obige Formel für te kann umgeformt werden in

$$te = \frac{a + b + (\alpha + j)m}{\alpha + j + 2}$$

Setzt man in diese Formeln für:

$\alpha = 2 + \sqrt{2}$; $j = 2 - \sqrt{2}$

oder

$\alpha = 2 - \sqrt{2}$; $j = 2 + \sqrt{2}$

oder

$\alpha = j = 3$ (für den symmetrischen Fall)

ein, so ergeben sich die üblichen PERT-Formeln:[1)]

$$te = 1/6\,(a + 4\,m + b)$$

$$\sigma^2 te = [1/6\,(b - a)]^2$$

---

1) Diese α- und j-Werte sind bei der Entwicklung des PERT-Systems durch Probieren gefunden worden und haben eine in der Praxis bewährte Verteilungskurve ergeben.

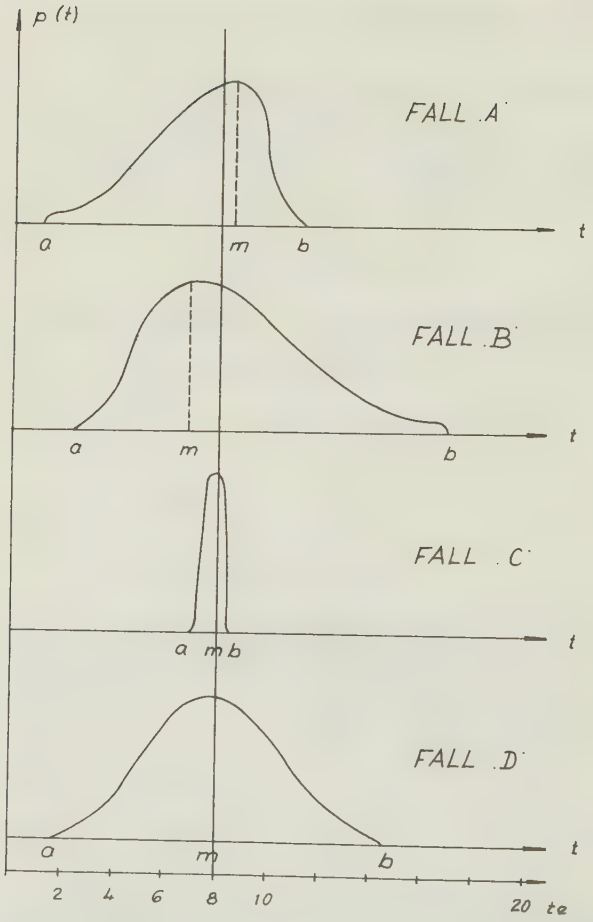


Abb. 24

Durch Umformung der Gleichung te = 1/6 (a + 4m + b) zeigt sich, daß der wahrscheinlichste Wert (te) das gewogene Mittel zwischen dem häufigsten Wert (m) und dem arithmetischen Mittel der Extremwerte mit der Gewichtung 2 : 1 ist. Die Abweichung vom häufigsten Wert beträt 1/3 der Differenz zwischen dem häufigsten Wert und dem arithmetischen Mittel der Extremwerte.[1] (Abb. 25)

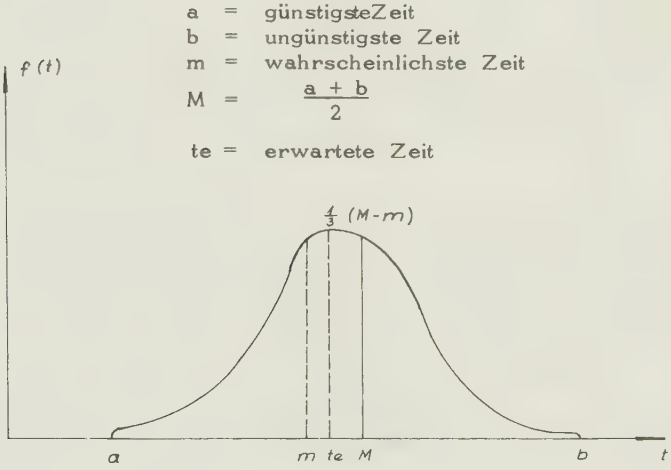


Abb. 25

Die 50 % Wahrscheinlichkeit, daß te die Zeitdauer der Aktivität ist, ergibt sich daraus, daß die Verteilungskurve durch die Senkrechte in te genau halbiert wird.

1) Den math. Beweis s. bei Stives, D.M.: Murphy, M.M.: PERT and CPM, Boston 1962, S.3o f. ebenda: "The expected time value may be interpreted as the weighted statistic average of the three time estimates, such that there is a, 5o - 5o chance of completing the activity at this time."

Mit einem vorgegebenen te-Wert (ohne Kenntnis von a und b) ist jedoch keine Aussage über den effektiven Kurvenverlauf möglich, da die Kurve rechts-, linksschief oder normal verteilt sein kann. (Abb. 26 und Tabelle).

Tabelle 26

Fall	a	m	b	te
A	2	9	10	8
B	4	7	16	8
C	7	8	9	8
D	2	8	14	8

Abb. 26

13212 Berechnung der Varianz ∂te^2

Maßstab für die Wahrscheinlichkeitsdichte und somit die Unsicherheit des Erwartungswertes te ist die mittlere quadratische Abweichung (Varianz) ∂te^2. Aus der Gleichung der Beta-Verteilung folgt:

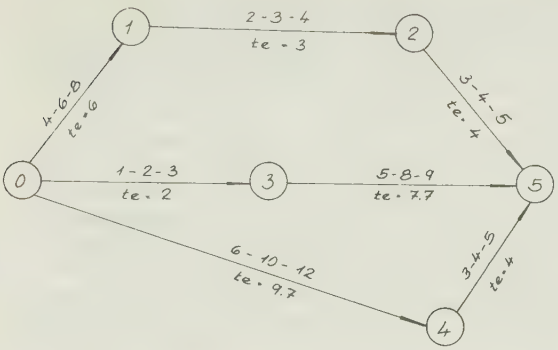
$$\partial te^2 = \left(\frac{b - a}{6}\right)^2$$

und die Standardabweichung:

$$\partial te = \frac{1}{6} (b - a)$$

Je weiter die beiden Extremwerte a und b voneinander entfernt liegen, desto geringer wird die Eintreffwahrscheinlichkeit für die erwartete Zeit te, und das zeitliche Risiko steigt entsprechend.

Nachfolgendes Beispiel soll diese Zusammenhänge verdeutlichen.[1] (Abb. 27)



Ereignis j	Vorhergehen des Ereignis i	Zeitschätzungen a-m-b	Erwartungszeit te	Varianz σ^2 te
1	0	4-6-8	6,0	0,4
2	1	2-3-4	3,0	0,1
5	2	3-4-5	4,0	0,1
3	0	1-2-3	2,0	0,1
5	3	5-8-9	7,7	0,4
4	0	6-10-12	9,7	1,0
5	4	3-4-5	4,0	0,1

Abb. 27

Aus obiger Tabelle wird deutlich, daß die Aktivität (O,4) nicht nur den größten Zeitbedarf beansprucht und auf dem kritischen Weg liegt, sondern daß sie außerdem noch den höchsten Unsicherheitsgrad hat.

1) Nach Univac-Mitteilungen, Planung mit PERT und CPM, a.a.O. S. 25

1322 Zeitpunkte der Ereignisse

Analog zu CPM sind bei PERT nach der Bestimmung der Aktivitätsdauer te die frühest zu erwartende Zeit TE und die spätesterlaubte Zeit TL festzusetzen. Es ist bei PERT jedoch zu beachten, daß die Zeitwerte stochastische Variable mit einer bestimmten Eintreffwahrscheinlichkeit sind.

Die Ermittlung der TE- und TL-Werte erfolgt genauso, wie dies für die Bestimmung der $t^{(o)}$ - und $t^{(1)}$ - Werte (bei CPM) beschrieben wurde. Der TE-Wert ergibt sich demnach durch die Summe der Aktivitätszeiten auf dem zeitlängsten Weg zum jeweiligen Ereignis. Subtrahiert man hingegen von der Gesamtprojektdauer die Summe der Aktivitätszeiten des zeitlängsten Weges, der vom Ereignis zum Ziel führt, so erhält man die spätestmögliche Zeit TL der jeweiligen Ereignisse.

Darüber hinaus werden bei PERT die zu den TE- und TL-Werten gehörigen Varianzen(δTE^2 , δTL^2) bestimmt, indem die Varianzen der jeweils längsten Wege addiert werden.

Obgleich die individuellen Zeitschätzungen nicht einer Normalverteilung entsprechen, da ja eine Beta-Verteilung zugrunde gelegt wurde, kann man dennoch aufgrund des zentralen Grenzwerttheorems annehmen , daß die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Ereigniszeitpunkte durch eine Normalverteilung angenähert werden kann. Diese Annäherung ist umso genauer, je mehr Aktivitäten zu dem Ereignis führen.[1)]

Die Varianz für das Zielereignis ist besonders wichtig, da sie die Wahrscheinlichkeit angibt, mit der der geplante Projektabschlußtermin eingehalten werden kann.

1323 Schlupfzeiten und kritischer Weg

Der PERT-Schlupf (slack) ist die Differenz von TE - TL. Dieser bestimmt den Zeitraum, um den ein Ereignis höchstens verschoben werden kann, ohne daß der Endtermin dadurch verzögert wird. Der PERT-Schlupf ist ereignisorientiert und unterscheidet sich

1) Vergl. Anderson, O.: Probleme der statistischen Methodenlehre in den Sozialwissenschaften, 4. Aufl., Würzburg 1962, S. 136 - 139

dadurch methodisch vom aktivitätsorientierten CPM-Schlupf (float).

Ist $\lambda = TE^n$, so hat das Projekt einen kritischen Weg. Dieser Weg ist wie bei CPM die Folge der Aktivitäten, die auf dem zeitlängsten Weg vom Start zum Schlußereignis liegen. Bei allen diesen Aktivitäten ist TE = TL und somit der Schlupf (S) = O. Eine einfache "Geradeaus-Addition" der erwarteten Aktivitätszeiten te erscheint jedoch problematisch, da hierbei die Unsicherheit der Zeiterwartungen unberücksichtigt bleibt.[1] So kann z.B. ein etwas kürzerer Weg "kritischer" sein als der längste, weil er besonders unsicher ist, d. h. die Summe der Varianzen auf dem etwas kürzeren Weg ist größer als die auf dem längsten Weg. Einen Lösungsweg zur Berechnung des kritischen Weges, der die Unsicherheit der Zeiterwartungen berücksichtigt, zeigt Fulkerson, auf den hier verwiesen wird.[2]

1324 Terminüberwachung

Die bislang gemachte Annahme, daß $t_n^{(o)} = \lambda$ ist, und somit der durch Summierung der kritischen Aktivitäten rechnerisch bestimmte frühestmögliche Projektabschluß dem extern vorgegebenen Abschluß λ entspricht, ist in der Praxis vielfach nicht gegeben. In den meisten Fällen sind "die Zeitpunkte für einzelne Stadien eines Projektes - für Zwischenstufen ebenso wie für die endgültige Fertigstellung - durch Zeitpläne im voraus festgelegt".[3]

Stimmt der geforderte Termin TS nicht mit dem rechnerischen überein, so interessiert die Unternehmensleitung:

1. Die Wahrscheinlichkeit, daß der für das jeweilige Ereignis festgesetzte Zeitpunkt eingehalten werden kann.
2. Die Wahrscheinlichkeit der fristgerechten Gesamtprojektfertigstellung.

---

1) Vergl. Mac Crimmon, K.R.: Ryavec, Ch.A., a.a.O. S. 16 ff.

2) Vergl. Fulkerson, D.R.: Expected Critical Path Lengths in PERT Networks, in: Operations Research, Vol. 10/No. 6 (1962), S. 808 ff.

3) Univac-Mitteilungen, a.a.O., S. 33

3. Möglichkeiten der Plankorrektur.

13241 Wahrscheinlichkeitsverteilung des Schlupfes

Da die frühestmöglichen Zeiten TE und spätesterlaubten Zeiten TL keine deterministischen Werte, sondern die häufigsten Werte der jeweiligen Normalverteilung sind, ist der zwischen den TE- und TL-Werten liegende Schlupf ebenso ein Erwartungswert. Es kann somit der tatsächliche Schlupf vom erwarteten Schlupf abweichen, wobei durch die Lage der Wahrscheinlichkeitsverteilungen von TE und TL und deren Varianz das Maß der Abweichungsmöglichkeit bestimmt ist. (Abb. 28).

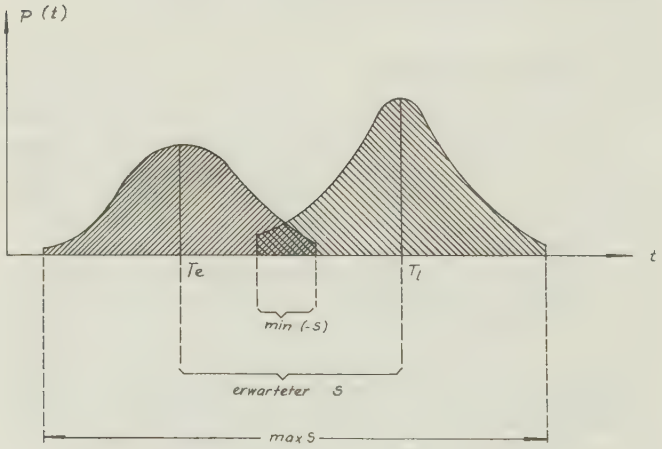


Abb. 28

Der tatsächliche Schlupf kann einen Wert zwischen S max und S min (=negativer Schlupf) annehmen. Der erwartete Schlupf (S) zwischen TE und TL ist hierbei der häufigste Wert einer Normalverteilung des Schlupfes, deren Varianz gleich der Summe der Varianzen der beiden Ereignispunkte ist.

Für die Schlupfvarianz V (S) der Normalverteilung des Schlupfes gilt:

$$V(S) = \delta TE^2 + \delta TL^2$$

Es läßt sich nun feststellen, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein bestimmter Schlupf (ts) eintreten wird. (Abb. 29)

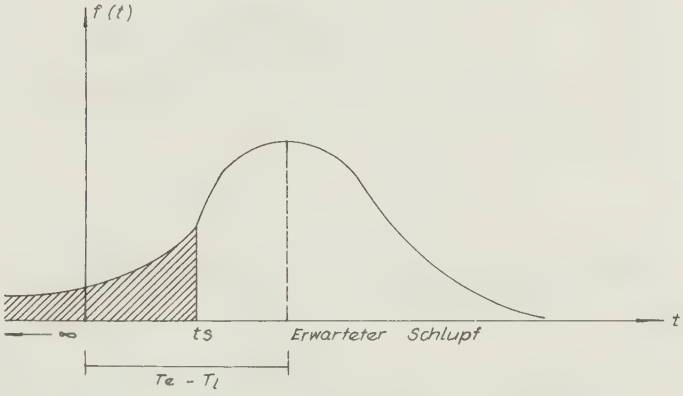


Abb 29

Der Kurvenverlauf (Abb. 29) ist bestimmt durch den Zentralwert (= erwarteter Schlupf) und die Schlupfvarianz ($= \delta TE^2 + \delta TL^2$). Die Wahrscheinlichkeit, daß ein bestimmter Schlupf (ts) eingehalten wird, entspricht der schraffierten Fläche unter der Kurve von minus Unendlich bis zur Zeit ts. Meist stellt man mit Hilfe der Normalverteilung des Schlupfes fest, welche Wahrscheinlichkeit für jedes Ereignis besteht, keinen Schlupf zu haben. (TL - TE = O). Graphisch (s. Abb. 29) ist die Wahrscheinlichkeit, daß der effektive Schlupf gleich Null ist, und somit das Ereignis auf dem kritischen Weg liegt, durch die Fläche unter der Kurve von minus Unendlich bis zur Ordinatenachse gekennzeichnet. (Von der Ordinatenachse ab deshalb, weil hier TL - TE = O).

Ist TE = TL - liegt das Ereignis also auf dem kritischen Weg - dann verläuft die Ordinatenachse durch den Gipfelpunkt der Normalverteilungskurve und die Wahrscheinlichkeit, daß der effektive Schlupf gleich Null ist, beträgt 50 %, da die Fläche unter der Kurve

durch die Ordinate halbiert wird.[1)]

Wandelt man die Normalverteilung des Schlupfes in eine Standard-Normalverteilung um, so läßt sich die Wahrscheinlichkeit (W) für jeden Schlupf aus Tabellen der Standard-Normal-Verteilung ermitteln.

Ist Z = Standard-Normalabweichung

ts = beliebige Zeit

S = erwarteter Schlupf = $TL - TE$

$\sigma s = \sqrt{\text{Schlupfvarianz}} = \sqrt{TL^2 + TE^2}$

so folgt aus der Umwandlung in eine Standard-Normalverteilung:[2)]

$$Z = \frac{ts - S}{\sigma s}$$

13242 Wahrscheinlichkeit für die Einhaltung eines geplanten Termines

Die Bestimmung der Wahrscheinlichkeit, daß ein ex ante festgesetzter Termin TS für ein Ereignis eingehalten wird, kann als ein Sonderfall der Berechnung der Pufferzeit-Wahrscheinlichkeit angesehen werden.[3)] Die Ereigniszeit TS ist hier fest gegeben und ihre Varianz und Standardabweichung ist somit gleich Null. Definiert man die Eintreffwahrscheinlichkeit des Termines TS unter Benutzung der errechneten frühestmöglichen Zeit TE, so folgt aus

$$X = \frac{(TS - TE)}{\sigma TE} \quad 4)$$

um wieviel Standardabweichungen der gesetzte Termin vom erwarteten abweicht. Aus einer Tabelle der Gauss'schen Normalverteilung kann man dann für jeden beliebigen X-Wert die zugehörige Wahrscheinlichkeit,

---

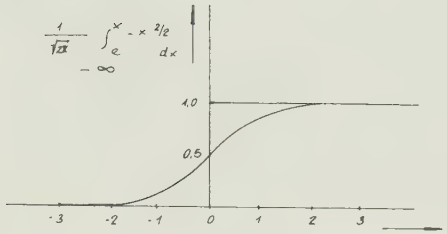
1) Vergl. Univac-Mitteilungen, a.a.O., S. 32

2) Vergl. Univac-Mitteilungen, a.a.O. S. 32 sowie Weber, K.: PERT ..... a.a.O. S. 41 ff.

3) Vergl. Univac-Mitteilungen, a.a.O. S. 33

4) Entsprechend kann eine Wahrscheinlichkeitsberechnung von TS unter Benutzung der TL-Werte erfolgen, s. hierzu Univac-Mitteilungen, a.a.O., S. 35

daß der ex ante festgesetzte Termin TS eingehalten wird, entnehmen.[1] (Abb. 30)



Integrierte Gaussverteilung $x = (t_S - t_e)/\sigma_e$

Abb. 30

Ist z.B. TS = TE und damit X = O, so besteht eine Wahrscheinlichkeit von 5O %, daß der vorgegebene Termin eingehalten werden kann (Abb. 3O). Nach diesem Verfahren werden in der Praxis meist nur die Endtermine untersucht. Die amerikanische Luftwaffe stellt darüber hinaus auch für die Meilensteine diese Wahrscheinlichkeitsüberlegung an.[2] X-Werte von unter 25 % werden hierbei als besonders kritisch bezeichnet und X-Werte zwischen 25 % - 6O % als normal. X-Werte von über 6O % zeigen an, daß Produktionsfaktoren überzählig sind.[3]

1) Vergl. Kattwinkel, W.: Über zwei Anwendungsmöglichkeiten von Netzwerken mit gerichteten Teilstrecken, in: IBM Fachbibliothek, S. 7
IBM Form 78101

2) Vergl. Weber, K.: PERT ...., a.a.O., S. 43

3) Aeronautical Systems Division of Air Force Systems Command. Program evalution review technique, Wash. 1962, S. VI 139

13243 Möglichkeiten der Plankorrektur

Kann man aufgrund obiger Überlegungen mit der Einhaltung der Vorgabezeiten nicht mehr rechnen, so sind Korrekturen im Zeit- und/oder Ablaufplan (rescheduling) erforderlich. Es können möglichst viele Aktivitäten parallel geschaltet oder wenn dies technologisch nicht realisierbar ist, können bestimmte Aktivitäten beschleunigt werden. Ist $TS_n < T_n^{(o)}$, dann werden bei Berücksichtigung der neuen Vorgabezeit TS_n einige totale Pufferzeiten negativ. Diese Aktivitäten sind so zu beschleunigen (z.B. durch zusätzliche Arbeitskräfte), daß die negativen totalen Pufferzeiten wegfallen. Es handelt sich hierbei jedoch nur um eine Näherungslösung und nicht um einen Optimalplan, da Kostenüberlegungen unberücksichtigt bleiben.[1)]

1) Vergl. Department of the Navy .... PERT Summary report phase I, a.a.O., S. D/2

2 Anwendungsmöglichkeiten der Netzwerkplanung im Baubetrieb

Nachdem im ersten Teil dieser Arbeit versucht wurde, die Grundlagen der Netzwerkplanung darzustellen, sollen im folgenden die Anwendungsmöglichkeiten im Baubetrieb untersucht werden. Da hierbei die Besonderheiten der Bauproduktion zu beachten sind, wird zunächst ein Überblick über diese erforderlich.

21 Strukturprobleme des Baubetriebes

Die Bauproduktion erfolgt in Auftragsfertigung und überwiegend im Freien, an einem vom Auftraggeber bestimmten Ort. Das Ergebnis der baubetrieblichen Leistungserstellung kann im Gegensatz zu den Produkten anderer Branchen nur an seinem vorausbestimmten Standort genutzt werden, da es mit dem Boden fest verbunden ist. Die Bodengebundenheit des Bauwerkes beeinflußt sowohl die Bauwerkskonstruktion als auch den Produktionsprozeß, wobei eine enge Wechselbeziehung zwischen beiden besteht.[1] Die Hauptmerkmale der Bauproduktion sind:

Wechselnde Betriebsstätten
Langfristige Einzelfertigung
Abhängigkeit der Bauleistung von den Witterungsverhältnissen und
Auftragsfertigung.

Hieraus ergeben sich die betriebswirtschaftlichen Strukturprobleme des Baubetriebes, die bei allen betrieblichen Funktionen wie: Beschaffung, Finanzierung, Investition, Produktion, Personalpolitik, Kalkulation, Kostenrechnung, Organisation und nicht zuletzt bei der Planung zu beachten sind, wenn ein optimales Ergebnis erzielt werden soll.

---

1) Vergl. Gossmann, H.: Grundlagen der Fertigungsorganisation im Bauwesen, Berlin 1961, S. 92

211 Wechselnde Betriebsstätten

Die stationäre Industrie erstellt ihre Produkte in einem ortsfesten Fabrikbetrieb.[1] Die Abmessungen, die Lage und die Beschaffenheit der Produktionsstätte wird vom Produzenten unter Berücksichtigung der zu produzierenden Güter festgelegt. Der optimale Standort ist dort, wo die erforderlichen Produktionsfaktoren mit geringsten Kosten beschafft werden können und möglichst günstige Absatzbedingungen gegeben sind. Im Baubetrieb ist hingegen die Fertigungsstelle dort, wo der Bauherr sein Bauwerk errichten möchte.[2] Für jeden neuen Auftrag ist eine neue Baustelle einzurichten und nach Beendigung der Bauarbeiten wieder aufzulösen. Nicht nur Baustoffe sondern auch Maschinen und Arbeitskräfte sind bereitzustellen, was eine ständig neu zu lösende Planungsaufgabe bedeutet. Erschwerend ist hierbei, daß kaum eine Baustelle der anderen gleicht, sondern sich durch Konstruktion, Lage und Umfang unterscheiden. Weiterhin wirkt es sich insbesondere bei Planungs- und Organisationsaufgaben negativ aus, daß Betriebsleitung und Betriebsstätte voneinander getrennt sind. Hierdurch entstehen nicht nur zusätzliche Aufwendungen für Baubüros und örtliche Bauleitung, sondern die Planung, Organisation, Überwachung und Koordinierung durch die Betriebsleitung wird beeinträchtigt.

Das Wandern der Produktionsstätten stellt auch an die Betriebsmittel besondere Anforderungen. Um hohe Transport-, Einrichtungs- und Räumungskosten zu vermeiden, sollten leichte, mobile Geräte und Maschinen verwandt werden. Andererseits sind gerade Baumaschinen einem starken Verschleiß ausgesetzt, so daß eine robuste Bauweise erforderlich ist. Das Bestreben, produktivere Baumaschinen einzusetzen, steht mit obiger Forderung vielfach ebenso im Widerspruch. So ist es schwierig, vollautomatische Betonmischanlagen zu bauen, die gleichzeitig leicht umsetzbar sind, denn hierzu gehören auch entsprechende Zuschlagstoffbunker, Wiege-

---

1) Vergl. hierzu de le Roi, R. und Brüggemann, F.H.: Die Industrie der wandernden Fabriken, Wiesbaden - Berlin 1959

2) Zur Fertigbauproduktion in diesem Zusammenhang s. S. 55

einrichtungen, Zementsilos, Zementschnecken, Schrapperanlagen usw.[1)]

Auf die Arbeitskräfte wirkt sich der ständige Wechsel des Arbeitsplatzes gleichfalls nachteilig aus. Nur 1o - 2o % der Belegschaft sind Stammarbeiter, die bei einer Firma von einer Baustelle zu anderen mitwandern. Der größte Teil der Beschäftigten beendet sein Arbeitsverhältnis mit der Fertigstellung des Bauprojektes.[2)] Das Zugehörigkeitsgefühl des Arbeiters zu "seiner" Firma und ein entsprechender Leistungswille bleiben somit auf die Stammarbeiter beschränkt. Aber auch von diesen wandern viele in die stationäre Industrie ab, die in bezug auf Sozialeinrichtungen und Arbeitsbedingungen Vorzüge gegenüber dem Baubetrieb aufweisen kann. Neueinstellungen und Entlassungen verursachen nicht nur Kosten, sondern darüber hinaus ein ständiges Schwanken des quantitativen und qualitativen Leistungsniveaus. Höhere Personalkosten ergeben sich weiterhin dadurch, daß für auswärtige Arbeitskräfte Auslösungen gezahlt werden müssen und Unterkünfte bereitzustellen sind.

Aufgrund der aufgeführten Schwierigkeiten sind viele Baubetriebe dazu übergegangen, einzelne Bauarbeiten zentral durchzuführen. So werden auf einem Bauhof neben der Lagerung der Materialien Schalungselemente für die einzelnen - meist kleineren - Baustellen vorbereitet. Auch das Eisen wird hier geschnitten und gebogen und ist auf den Baustellen nur noch zu verlegen. Darüber hinaus werden zentrale Betonaufbereitungsanlagen (Mischtürme) errichtet, von denen der Beton mit Betonfahrzeugen zu den Baustellen befördert wird.

Dies sind freilich nur Versuche, die die aufgezeigten Schwierigkeiten abmindern, jedoch nicht beseitigen.

Eine einschneidende Maßnahme, diesen strukturbedingten Schwierigkeiten zu begegnen, ist der Fertigteilbau. Dies ist gleichzeitig der Schritt von den "wandernden Fabriken" zur stationären Industrie. Lediglich die Erd- und vorbereitenden Arbeiten sowie

---

1) Vergl. Gossmann, H.: a.a.O., S. 94
Die Baumaschinenentwicklung hat in dieser Richtung in der letzten Zeit große Fortschritte gemacht (Mobil-Mixer).

2) Vergl. de le Roi, Brüggemann, F.H., a.a.O., S. 13

die Montage der vorgefertigten Elemente erfolgt auf den einzelnen Baustellen. Voraussetzung hierfür ist jedoch der Großserienbau sowie eine fertigungsgerechte Projektierung der Bauvorhaben.

212 Langfristige Einzelfertigung

Die Errichtung eines Bauwerkes ermöglicht nur im beschränkten Umfang die parallele Ausführung von mehreren Teilarbeiten. Es ist ein technologisch bedingter Bauablauf vorgeschrieben, bei welchem die zeitliche Aneinanderreihung der einzelnen Operationen durch die Bauwerkskonstruktion bedingt ist. So müssen erst die Ausschachtungsarbeiten beendet sein, bevor die Fundamente des Baukörpers betoniert werden können, um dann anschließend das Kellermauerwerk zu erstellen. Relativ lange Bauzeiten sind daher beim konventionellen Bauen - im Gegensatz zum Fertigteilbau, bei welchem viele Operationen parallel geschaltet werden können - unvermeidbar. Lange Bauzeiten erhöhen das Produktionsrisiko, denn Tariferhöhungen und Preissteigerungen bei den Baumaterialien sind vom Bauunternehmer zu tragen, da der Auftraggeber Preisgleitklauseln meist ablehnt.

Nicht nur die langfristige Produktion, sondern besonders die Individualfertigung der Bauvorhaben bedingt ein großes Produktionsrisiko. Zunächst ergeben sich aus dem Standort des Bauwerkes viele Imponderabilien, die nur schwer kalkulierbar sind. Baugrundbeschaffenheit, Wasser- und Energieversorgungsmöglichkeiten, Wasserandrang und Grundwasserstand, Materialantransport sowie die Möglichkeit, ortsansässige Arbeitskräfte anzuwerben, sind oft ungeklärte Fragen bei der Angebotsabgabe.

Risiken aus der Bauwerkskonstruktion selbst liegen vor, wenn statische und/oder konstruktiv neue Verfahren zur Anwendung kommen sollen. Auch für besondere Bauvorhaben erforderliche Spezialmaschinen bedingen ein Investitionsrisiko, da es bei einer erforderlichen Neuanschaffung unklar ist, wann diese Maschine bei einem ähnlichen Auftrag wieder eingesetzt werden kann.

Die technologisch bedingte Abhängigkeit der einzelnen Bauarbeiten kann sich auch nachteilig auf den Einsatz der Arbeitskräfte auswirken. Es können hierdurch technisch bedingte Wartezeiten entstehen, oder ein Umsetzen der einzelnen Facharbeitergruppen von Baustelle zu Baustelle wird erforderlich.[1)] Eine stoßweise Belastung besteht ebenso bei vielen Baumaschinen. Es wird daher nur mit einer etwa 60%igen Geräteauslastung gerechnet. Kapitalintensive Mischanlagen sind oft nur wenige Tage im Monat eingesetzt, so daß der wirtschaftliche Rationalisierungseffekt technisch produktiver Anlagen fraglich wird.

Die Produktivität des Geräte- und Maschineneinsatzes ist weiterhin durch den wechselnden Einsatz bei unterschiedlichen Bauaufträgen reduziert. Die einzelnen Leistungsquerschnitte der Baumaschinen können nur unzureichend aufeinander abgestellt und den differenzierten Anforderungen der einzelnen Baustellen angepaßt werden. Während einige Maschinen noch über Leistungsreserven verfügen, haben die Engpaßaggregate bereits ihre Leistungsgrenze erreicht, was einen überproportionalen Treibstoffverbrauch und erhöhte Reparaturanfälligkeit bedingt.

Die Rationalisierungsmöglichkeiten im Baubetrieb werden weiterhin durch die Einzelfertigung von Bauprojekten stark eingeschränkt. Das zu erstellende Bauwerk ist vom Bauherrn bzw. dessen Architekten nach Art und Ausführung individuell geplant und Vorteile der Großserie entfallen. Infolgedessen hat der Baubetrieb in der Regel - im Gegensatz zu anderen Produktionszweigen - keinen Einfluß auf die Projektierung. Besondere fertigungstechnische Möglichkeiten - wie z.B. das Vorhandensein einer Spezialschalung - bleiben somit meist ungenutzt. Eine enge Zusammenarbeit zwischen Projektierung und Ausführung könnte jedoch wesentlich dazu beitragen, die Baukosten zu senken, wenn schon bei der Planung "die Belange einer rationellen Fertigung nach den Gesichtspunkten des Entwicklungsstandes der Produktionstechnik und - organisation berücksichtigt" würden.[2)]

Hemmungen für Rationalisierungsmöglichkeiten sind jedoch nicht nur dadurch bedingt, daß dem Bauunternehmer ein nach Art und Umfang fest vorgegebenes Projekt in Auf-

---

1) Über die Möglichkeiten der Planung des Arbeitskräfteeinsatzes s. unter 26 und 27

2) Vergl. Gossmann, H.: a.a.O., S. 98

trag gegeben wird, sondern daß darüber hinaus noch kurzfristige Fertigstellungstermine verlangt werden. Der Bauslogan "Gestern Auftrag erhalten, heute angefangen und morgen fertig" kennzeichnet das Dilemma der Bauwirtschaft recht deutlich. Würde hingegen eine langfristige Auftragsvergabe erfolgen, so könnte der Baubetrieb durch entsprechende Auftragspolitik seine Beschäftigungsschwankungen weitgehend ausgleichen und damit eine langfristige Kapazitätsauslastung planen. Dies ist umsomehr erforderlich, als im Baubetrieb ein ständiger Substitutionsprozess von Arbeit durch Kapital stattfindet, der die früher bestehende Elastizität des Baubetriebes gegenüber Beschäftigungsschwankungen reduziert hat.

Auf den Finanzierungsbereich einer Bauunternehmung wirkt sich die langfristige Einzelfertigung gleichfalls nachteilig aus. Im Gegensatz zu anderen Branchen der Auftragsfertigung (wie z.B. Schiffs- und Großmaschinenbau) ist es im Baubetrieb nicht üblich, Zahlungen bei Auftragserteilung zu leisten. Der Bauunternehmer muß zunächst erhebliche Aufwendungen vorfinanzieren bis er "Abschlagszahlungen" einreichen kann. Selbst nach Fertigstellung der Bauarbeiten werden nicht unerhebliche Geldmittel als "Sicherheit" vom Auftraggeber zurückbehalten, was den Liquiditätsspielraum der Bauunternehmung weiter einengt.

213 Abhängigkeit der Bauarbeiten von den Witterungsverhältnissen

Die Errichtung von Bauwerken erfolgt überwiegend im Freien, so daß sowohl der Produktionsprozess als auch die Produktionsfaktoren weitgehend den Witterungseinflüssen ausgesetzt sind. So können Wind, Feuchtigkeit und/oder Temperatur zu einer Produktionsbehinderung oder sogar zu einer Baustillegung führen, was besonders für die Wintermonate zutrifft. Schlechtwetterbedingte Ruhepausen im Winter und Auftragsballungen in den Sommermonaten sind die Kennzeichen der saisonalen Beschäftigungsschwankungen eines Baubetriebes. Dieses widerspricht jedoch "dem Ideal eines rational gestalteten Betriebsablaufes, das in einem ständig gleichbleibenden, die vorhandenen Kräfte gerade

voll in Anspruch nehmenden Umsatzvolumen besteht".[1] Der Betrieb tendiert "wie alle hoch entwickelten Strukturen nach Geschlossenheit, Einheitlichkeit, Einfachheit und Regelmäßigkeit".[2] Eine ausgeglichene Beschäftigung und kontinuierliche Bautätigkeit erfordert jedoch:

1. Eine gezielte langfristige Auftragsvergabepolitik des Staates, dem aufgrund einer teilmonopolistischen Nachfragestellung am Baumarkt große Bedeutung zukommt.

2. Einen Ausgleich der Überbeschäftigung im Sommer durch ein sinnvolles "Bauen ohne Winterpause".

Dieses Bauen im Winter ist heutzutage technisch meist möglich, wobei jedoch zusätzliche Winterbaumaßnahmen erforderlich werden, die mit Mehrkosten verbunden sind.[3]

Auch die durch Schnee und Frost bedingten Minderleistungen sind hierbei zu berücksichtigen. Demgegenüber spricht für den Winterbau, daß bei "ganzjähriger Bautätigkeit" eine entsprechende Fixkostendegression möglich wird, die bei der zunehmenden Mechanisierung der Bauarbeiten an Bedeutung gewinnt. Weiterhin können Remanenzerscheinungen und das Abwandern von Fachkräften in die stationäre Industrie vermieden werden.

214 Auftragsfertigung

Wechselnde Betriebsstätten, langfristige Einzelfertigung und Witterungsabhängigkeit der Bauleistungen beeinträchtigen eine gleichmäßige Auslastung der baubetrieblichen Produktionsfaktoren. Zusätzliche Hemmnisse für die kontinuierliche Bautätigkeit ergeben sich aus der Auftragsfertigung von Bauleistungen. Der stationäre Betrieb produziert - im Gegensatz zum Baubetrieb - für einen anonymen Markt. Die Produktion liegt hierbei zeitlich vor dem Absatz der hergestellten Güter, so daß eine Lagerhaltung meist möglich ist. Produktionsprogramm, Quantität und Qualität der Produkte legt der Unternehmer

---

1) Schäfer, E.: Die Unternehmung Bd. II, Köln-Opladen 1949, S. 175

2) Schulz, K.H.: Die Ökonomie des Saisonbetriebes, Diss. Nürnberg 1953, S. 125

3) Ausführlich hierzu: Ebel, H.-J.: Problematik des Winterbaues, Meisenheim 1966

fest, wobei mit Hilfe der Marktforschung die Verkaufschancen der einzelnen Produkte abgetastet werden, so daß erforderliche Plankorrekturen des Produktionsprogrammes rechtzeitig durchgeführt werden können. Darüber hinaus stehen den stationären Betrieben meist Möglichkeiten der Absatzlenkung und Marktbeeinflussung (Werbung) zur Verfügung.

"Der "Markt" für Bauleistungen wird erst durch die "Nachfrage", d.h. durch die Aufforderung zum Angebot einer individuellen Leistung - und auch jeweils nur für diese Leistung - hergestellt."[1] Der Absatz folgt im Baubetrieb somit zeitlich nicht der Produktion, sondern umgekehrt. Eine Lagerhaltung ist wegen der Individualanfertigung nicht gegeben, so daß zunächst ein Bauherr gefunden werden muß, bevor man mit der Produktion beginnen kann. Der Baubetrieb zeichnet sich als ein Bereitschaftsbetrieb aus. Ein "Auftragspolster", das langfristig eine ausgeglichene Beschäftigung erlauben würde, ist wegen der vom Auftraggeber festgelegten kurzfristigen Ausführungstermine nicht möglich. Da Marktprognosen für einen Baubetrieb schwierig sind, ist eine langfristige Kapazitätsplanung kaum möglich. Produktionsballungen mit überproportionalem Kostenanstieg und Stillstandszeiten mit entsprechenden Leerkosten, sind strukturbedingte Nachteile der baubetrieblichen Auftragsfertigung. Hinzu kommt, daß die Wettbewerbsbedingungen des einzelnen Baubetriebes sehr ungünstig sind. Während in den meisten Branchen der Produktpreis aufgrund einer genauen Kostenrechnung und unter Berücksichtigung der Marktsituation ermittelt wird, muß die Preisgestaltung für ein neues Bauprojekt auf Erfahrungswerten aufbauen. Hierbei ist zu beachten, daß in der Vorkalkulation diese Erfahrungswerte nur bedingt anwendbar sind, da die jeweiligen spezifischen Bauverhältnisse wie Bodenbeschaffenheit, Wasserandrang, Witterung usw. zu berücksichtigen sind. Dieses Kalkulationsrisiko wird durch die fehlende Markttransparenz noch erhöht, da sowohl die Mitanbieter als auch deren Angebote unbekannt sind.

Die Schwierigkeiten und Imponderabilien, die sich aus der "Eigengesetzlichkeit der Bauproduktion" ergeben, stellen an die Bauablaufplanung besondere Anforderungen. Inwieweit die Netzwerkplanung ein geeignetes Instrument für die Optimierung von Bauzeit und Potentialauslastung ist, soll im folgenden untersucht werden.

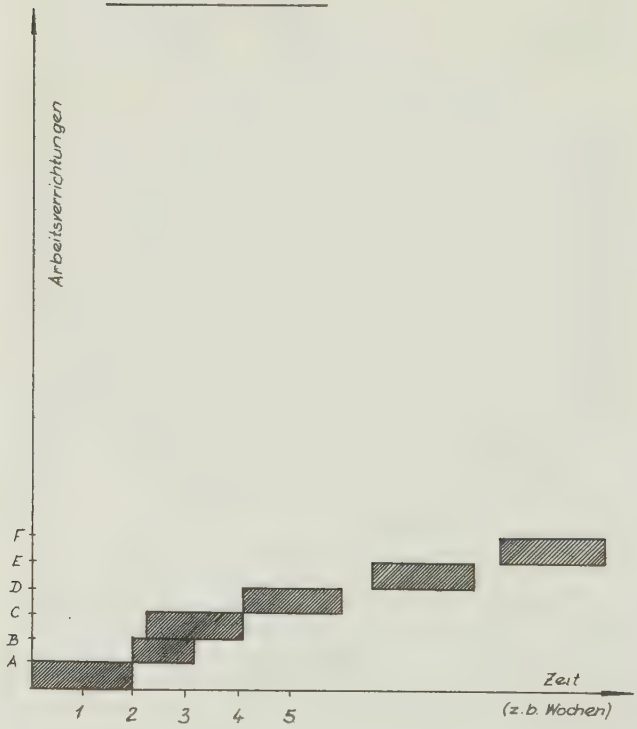
---

1) de le Roi, R.: Brüggemann, F.H.: a.a.O., S. 4

22 Vorteile der Netzwerkplanung gegenüber den herkömmlichen Methoden

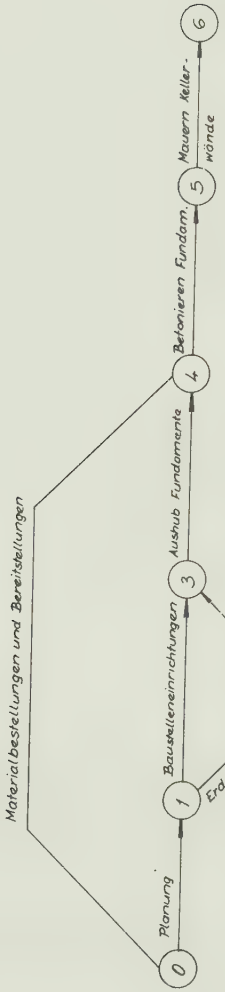
Ebenso wie bei der Netzwerkplanung wird beim Bauzeitenplan (s. Abb. 31) zunächst das gesamte Bauprojekt in einzelne Arbeitsvorgänge zerlegt. Diese werden dann in einem Balkendiagramm entlang einer Zeitachse aufgetragen. Im Gegensatz zur Netzwerkdarstellung (s. Abb. 32) ist jedoch aus dem Bauzeitenplan nicht ersichtlich, welche logischen bzw. technologischen Zusammenhänge zwischen den einzelnen Verrichtungen bestehen. Darüber hinaus folgt aus der Verknüpfung von Ablauf- und Zeitplan im Bauzeitenplan, daß dieser gegenüber zeitlichen Verschiebungen nicht beweglich ist. Gerade die Eigenart der Bauproduktion erfordert jedoch, daß vielfach Umdispositionen erforderlich werden. Diese zeitlichen Verschiebungen, die sich auf den gesamten Projektablauf auswirken können, werden im Bauzeitenplan nicht berücksichtigt. In der Netzwerkplanung erfolgt hingegen eine scharfe Trennung zwischen Ablauf- und Zeitplan. Die Strukturdarstellung mit Hilfe der Netzwerktechnik bleibt deshalb von zeitlichen Verschiebungen unberührt. Verlängerungen bestimmter Aktivitäten und ihre Auswirkungen auf den zeitlichen Gesamtablauf können mit Hilfe der Netzwerkplanung einfach ermittelt werden, und evtl. erforderliche Maßnahmen zur Wahrung des Endtermines können sinnvoll erfolgen. Hierbei hilft die Kenntnis des kritischen Weges, weil sich nur hier zeitliche Verschiebungen auf den Bautermin auswirken. Soll eine Verkürzung des Bautermines erfolgen, so ist aus dem Bauzeitenplan nicht ersichtlich, wo zusätzliche Produktionsfaktoren einzusetzen sind. Werden diese jedoch nicht auf dem kritischen Weg eingesetzt, so wird keine Verkürzung des Bautermines erreicht. Ein weiterer Vorteil der Netzwerkplanung besteht darin, daß die Konstruktion eines Netzwerkes zum genauen Durchdenken des Projektablaufes zwingt und alle Aufgaben berücksichtigt und richtig eingeordnet werden können. Die graphische Netzwerkdarstellung ermöglicht hierbei eine gute Kontrolle. Auch das Aufstellen von alternativen Plänen und deren Vergleich miteinander ist mit Hilfe der Netzplantechnik einfach und übersichtlich. Ein weiterer Vorzug der Netzwerkplanung besteht darin, daß der Grundsatz des "management by exception" berücksichtigt wird, da die Unternehmensleitung nur dann in den Projektablauf einzugreifen braucht, wenn eine Verzögerung der kritischen Aktivitäten zu erwarten ist. Das Unsicherheitsmoment der Planung

BAUZEITENPLAN



A: Planung
B: Baustelle einrichten
C: Erdarbeiten
D: Aushub Fundamente
E: Betonierung Fundamente
F: Mauern Kellerwände

Abb. 31



NETZWERKDARSTELLUNG

Abb. 32

kann bei Anwendung der Netzwerkplanung gleichfalls beachtet und bewertet werden.
Daß es darüber hinaus neben der zeitlichen Ablaufplanung mit Hilfe der Netzwerkplanung möglich ist, Kosten- und Kapazitätsüberlegungen zu berücksichtigen, wird noch zu zeigen sein. Weiterhin kann die Netzwerkplanung als Kontrollinstrument benutzt werden, so daß für die Unternehmensleitung eines Baubetriebes ein umfassendes Steuerungsinstrument des Produktionsablaufes gegeben ist.

Die bisherigen Ausführungen haben gezeigt, daß die Netzwerkplanung dann ein besonders geeignetes Planungsinstrument ist, wenn komplexe Vorgänge zu planen sind, die nicht nach einem festen Schema-wie z.B. bei der Fließbandfertigung-ablaufen. Gerade im Baubetrieb ist eine ständige Neuorientierung erforderlich, so daß hier von einer gewissen Projektgröße ab, bei welcher der Bauablauf ohne Hilfsmittel unübersichtlich wird, die Anwendung der Netzwerkplanung sinnvoll erscheint. Es ist deshalb nicht verwunderlich, daß in den U.S.A. besonders der Bausektor ein reges Interesse an der Netzwerkplanung gezeigt hat.[1] Der höhere Planungsaufwand, der nach Angaben der US-Navy etwa 0,1 - 1 % der Gesamtkosten eines Projektes ausmacht und etwa das Doppelte eines herkömmlichen Planungsverfahrens beträgt, wird hierbei wegen der Vorteile der Netzwerkplanung in Kauf genommen.[2]

23 Organisatorische Fragen

231 Verfahrensauswahl

Die Netzwerkplanung zeichnet sich nicht zuletzt dadurch aus, daß sie den jeweiligen Branchenerfordernissen angepaßt werden kann. Im Zusammenhang mit der Zeitschätzung stellt sich die Frage, ob von "bestimmten" (wie bei CPM) oder von "unbestimmten" Aktivitätszeiten (wie bei PERT) auszugehen ist. Dieser

1) Vergl. Berman, H.: The Critical-Path Method für Project Planning and Control. In: The Constructor, Sept. 1961, S. 24 ff.

2) Vergl. Pocock, J.W.: PERT as an Analytical Aid for Programm Planning - its Payoff and Problems. In: The Journal of the Operations Research Society of America, Vol 10/No. 6, 1962, S. 893 ff.

Frage kommt besonders Bedeutung zu, denn kein Planungsverfahren und kein Steuerungssystem einer Unternehmensführung kann besser sein, "als die Zuverlässigkeit und die Genauigkeit der eingegebenen Werte".[1)]

Miller meint hierzu, daß "the single-time estimates works very well in such applications as construction projects, where standard exists for individual activities or where is a large amount of prior history on comparable activities".[2)]

Auch Stives und Murphy entscheiden sich für die einfachere CPM-Methode im Baubetrieb.[3)]
Für die Anwendung von CPM im Baubetrieb spricht, daß hier Erfahrungswerte über die Dauer der Aktivitäten vorliegen. Dennoch darf nicht übersehen werden, daß insbesondere durch die Abhängigkeit der Bauarbeiten von den Witterungseinflüssen eine genaue Zeitvorgabe nicht möglich ist.[4)] Eine Berücksichtigung des

---

1) Krüger, K.: a.a.O., S. 29

2) Miller, R.W.: Schedule, Cost and Profit Control with PERT, New York-Toronto-London 1963, S. 39. s. hierzu auch Dean, K.L.: Fundamentals of ....: a.a.O., S. 24 und Stives, D.M.: Murphy, M.M.: a.a.O., S. 119 f. sowie Wagner, G.: .... im Baubetriebsberater: a.a.O., S. 1582 f.

3) Vergl. Stives, D.M.: Murphy, M.M.: Modern Management Methodes, PERT and CPM, Boston 1962, S. 119. "Because of experience, keeness of competition and the nature of the work, a construction contractor can quote absolute time and cost figures for putting up a brik wall. This prediction is not even an estimate but a sure bet down to minutes and pennies. In building a house he can order nails to an accuracy within a handful certainly some imponderables give rise to an element of doubt but the good contractor will even make allowance for weather and usually be more correct than the meteorologist in the lony run."

4) Die meteorologischen Fähigkeiten eines Bauunternehmers dürften von Stives - Murphy überschätzt werden.

Wetters durch eine PERT-Wahrscheinlichkeitsverteilung steht jedoch in keinem Verhältnis zum Ergebnis, zumal die Festlegung einer "günstigen Zeit" und "ungünstigsten Zeit" in diesem Zusammenhang problematisch sein dürfte.[1)]

Sieht man - wie dies im folgenden geschehen soll - in den CPM-Planzahlen lediglich Soll-Werte, die durch laufende Gegenüberstellung mit den Ist-Werten korrigiert werden, so ermöglicht CPM eine in den meisten Fällen ausreichende Beurteilungsgrundlage für ein Bauprojekt. In Ausnahmefällen, wo Bauprojekte zur Ausführung kommen, bei denen z.B. die Gründungsverhältnisse unklar sind, unbekannte Baumethoden und Bauelemente zur Anwendung kommen oder Spezial-Baumaschinen verwandt werden, kann hingegen PERT geeigneter sein.[2)]

232 Planungsteam

Die Durchführung der Netzwerkplanung für ein bestimmtes Projekt ist nicht eine einmalige Aufgabe, sondern entsprechend dem dynamischen Charakter des Planungsverfahrens sind die jeweils aktuellen Daten zu berücksichtigen, so daß Planvariationen und - korrekturen erforderlich werden. Diese Aufgaben werden meist einer besonderen Stabsstelle (den "Program Planning Engineers"), die der Weisung einer leitenden Linieninstanz untersteht, übertragen. Entgegen den Grundsätzen der Organisation wird diesen Stabsstellen in US-amerikanischen Unternehmungen eine direkte Weisungsbefugnis im Bereich der Planung an untergeordnete Linieninstanzen zuerkannt. Dies hat sich deshalb als zweckmäßig erwiesen, weil beim Aufstellen eines Netzplanes eine enge Zusammenarbeit zwischen den Stabs- und den ausführenden Linienfunktionen einer Unternehmung erforderlich ist. Vielfach werden die Zeitschätzungen für die Dauer der Aktivitäten von den ausführenden Instanzen durchgeführt, so daß ihnen ein

---

1) Vergl. Wagner, G.: Die Anwendung der Netzplantechnik in der Bauwirtschaft durch Unternehmer, Bauträger, Ingenieure und Architekten, Wiesbaden 1965, S. 62

2) Vergl. Budil, W.: Die Praxis der Netzplantechnik in: Industrielle Organisation, Heft Nr. 11, 1963 S. 373 ff.

größeres Maß an Verantwortung im Bereich der Planung zukommt, was als ein Vorteil der Netzwerkplanung angesehen wird. Die Schätzungen für die Aktivitätsdauer sollten dort erfolgen, wo möglichst genaue Vorstellungen über den technologischen Ablauf und den Zeitbedarf bestehen. Im Baubetrieb bieten sich hierfür zunächst Bauführer und Poliere an. Aus psychologischen Gründen könnten jedoch diese ein "Zeitpolster" in die Schätzungen einbauen, so daß der Sinn der gesamten Planungsmethode fraglich wird. Im Baubetrieb sollte deshalb die Kalkulationsabteilung die Zeitangaben für die Dauer der Aktivitäten machen, da diese Zeitwerte bereits der Kalkulation zugrunde gelegt wurden und aus den Kalkulationsunterlagen ohne Mehraufwand entnommen werden können. Bei Großprojekten in den U.S.A. sind besondere Projektmanager mit der Planung und Plandurchführung des Projektes betraut worden, wodurch sich eine "Matrixorganisation" ergab.[1] (s. Abb. 33)

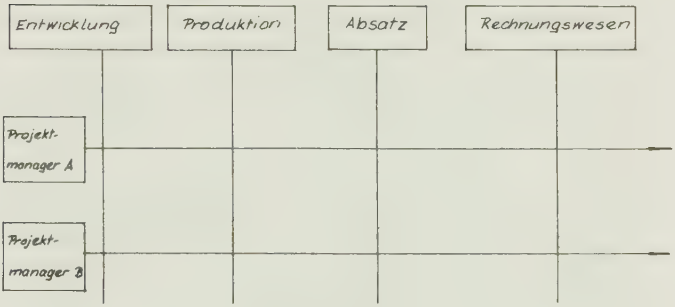
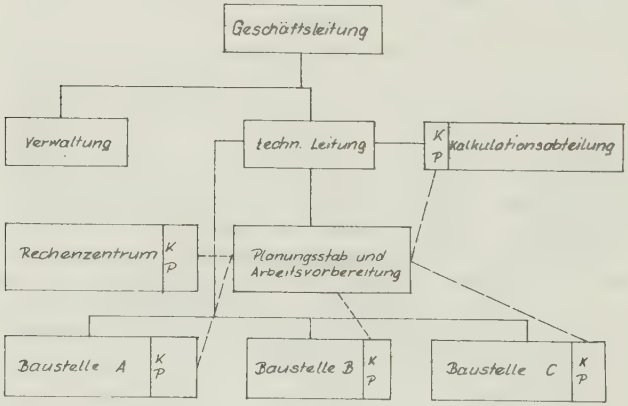


Abb. 33

1) Vergl. Mertens, P.: Netzwerktechnik als Instrument der Planung, In: Zeitschrift für Betriebswirtschaft, 34 Jg., 1964, Nr. 6, S. 399. s. auch Miller, R.W.: a.a.O., S. 156

Deutlich kommt hierbei auch in der Organisationsstruktur die Projektorientierung der Netzwerkplanung zum Ausdruck.
Für ein Bauunternehmen erscheint es zweckmäßig, die Planungsaufgaben einer Stabsstelle zu übertragen, die der technischen Betriebsleitung direkt untersteht, wobei eine Eingliederung des Planungsstabes in die Arbeitsvorbereitung möglich ist. Die Verbindung zu anderen Instanzen erfolgt über "Kontaktmänner", die die nötigen Informationen weiterleiten. (s. Abb. 34)
Diese Verbindungsleute haben einerseits die Aufgabe, Daten für die Aufstellung und Berechnung des Netzwerkes zu liefern, zum anderen nehmen sie die Soll-Werte der Planungsstelle entgegen, vergleichen diese mit den Ist-Werten und informieren die Stabsstelle über die Planabweichungen. Polier, Schachtmeister, Bauführer und Kalkulator können im Baubetrieb als "Kontaktmänner" tätig sein, wobei es sinnvoll erscheint, diese vorher über die Grundlagen der Netzwerkplanung zu informieren.



KP = Kontaktmann Planung

----- = direkte Weisungsbefugnis der Planungsstabsstelle

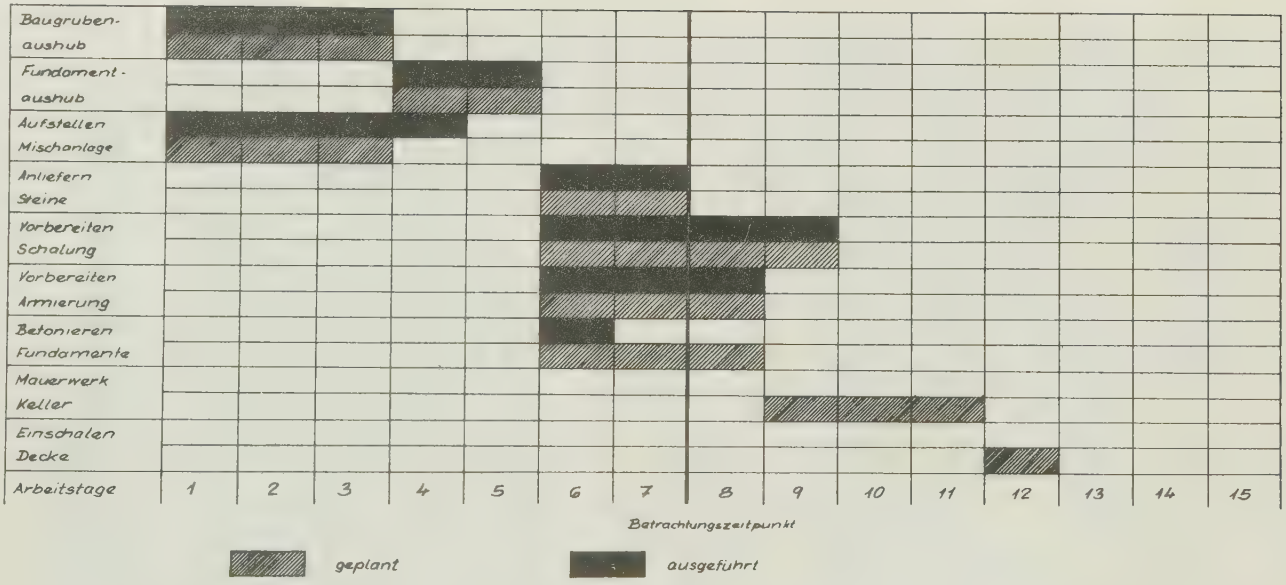
Abb. 34

233 Plankorrektur- und Berichtswesen

Zeitliche Abweichungen im Netzwerk während des Bauablaufes sind durch den Sollwertcharakter der Aktivitätszeiten bedingt. Diese können in einem 14-tägigen oder monatlichen Soll/Ist-Vergleich durch die Planungsstabsstelle erfaßt werden. Die Ist-Werte werden durch den Bauführer festgelegt, der die Werte an die Stabsstelle weiterleitet. Diese teilt dann dem Bauführer und der technischen Betriebsleitung den berichtigten Plan mit.
Das Netzwerk eignet sich hierbei als Grundlage zur Berichterstattung und als Kontrollinstrument, wobei sowohl Arbeitsfortschritt, Kosten und Stundenzahl überprüft werden können.
Wie das nachfolgende Beispiel zeigt, ist die Netzwerkdarstellung dem konventionellen Bauzeitenplan nicht nur bei der Planung, sondern auch bei der Kontrolle des Baufortschrittes überlegen (Abb. 35). Aus dem Bauzeitenplan ergibt sich eine insgesamt positive Beurteilung des Baufortschrittes, da nur der Arbeitsvorgang "Fundamente betonieren" im Rückstand ist, während die Vorbereitung der Schalung wie der Armierung bereits früher als geplant fertiggestellt sind. Die Netzwerkdarstellung zeigt hingegen, daß die verzögerte Aktivität "Fundamente betonieren" auf dem kritischen Weg liegt, so daß die Einhaltung des Projektabschlußtermines gefährdet wird. (Abb. 36)

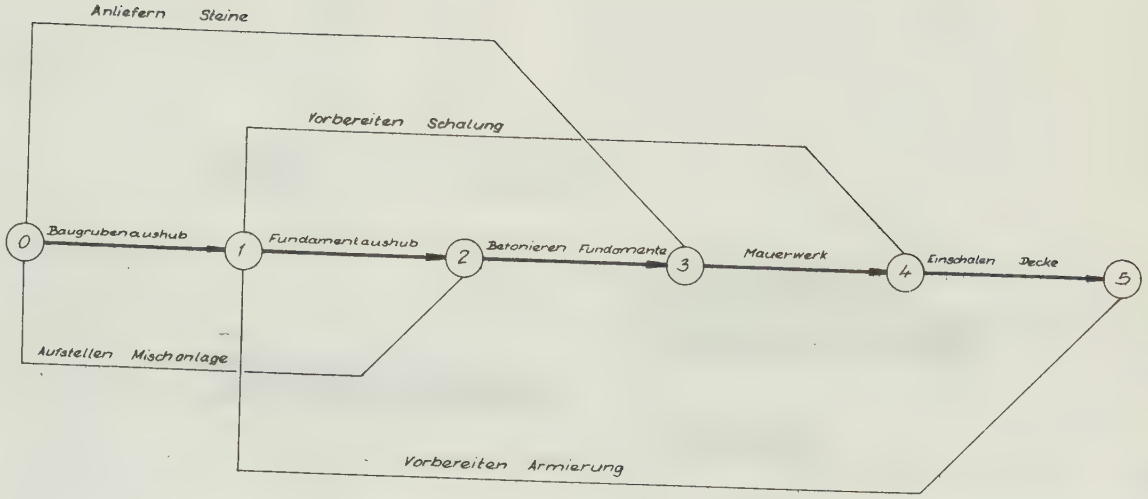
Als ein geeignetes Instrument der Bauzeitenkontrolle erscheint nachfolgende Darstellung (Abb. 37). Es werden hierbei die Netzwerkberechnungen in ein Balkendiagramm übertragen, wobei zunächst die kritischen und dann die nichtkritischen Aktivitäten mit ihrem Schlupf vermerkt werden. Die Bedeutung der Verzögerung einzelner Vorgänge für das Gesamtprojekt ist sofort ersichtlich, so daß entsprechende Beschleunigungsmaßnahmen rechtzeitig eingeleitet werden können.
Neben der Überwachung des Baufortschrittes ist die Kostenkontrolle von Interesse.[1] Es ist zu überprüfen, ob die bis zum Stichtag entstandenen Kosten dem Projektfortschritt entsprechen. Abweichungen von den geplanten Kosten sind darauf zu untersuchen, inwieweit

1) Hierfür wurde PERT-COST entwickelt, s. Tebo, K.M.: PERT-Cost Sonderdruck der General Motors.



BAUZEITENPLAN

Abb. 35



NETZWERKDARSTELLUNG

Abb. 36

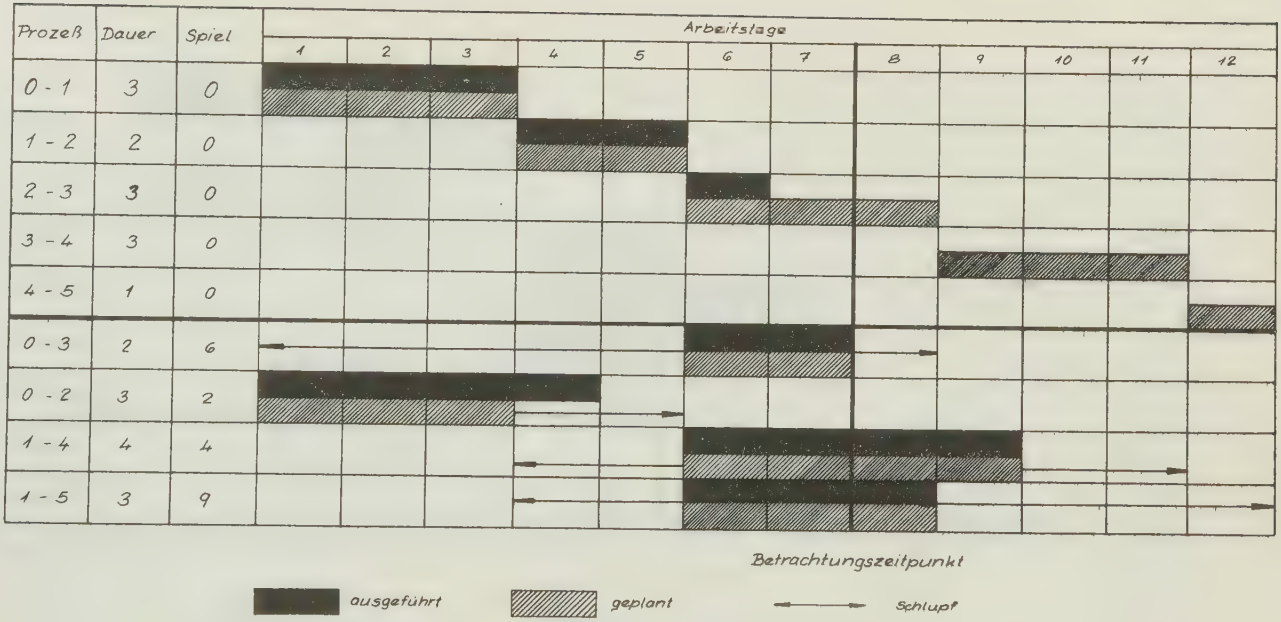

Prozeß
Dauer
Spiel
Arbeitslage
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
0 - 1
3
0
1 - 2
2
0
2 - 3
3
0
3 - 4
3
0
4 - 5
1
0
0 - 3
2
6
0 - 2
3
2
1 - 4
4
4
1 - 5
3
9
Betrachtungszeitpunkt
ausgeführt
geplant
Schlupf

Abb. 37

diese durch ein zeitliches Vorauseilen (Verzögern) des Ablaufes gegenüber dem Plan, oder durch Überschreitung (Unterschreitung) des Kostenbudgets bei Einhalten des zeitlichen Ablaufes bedingt sind.[1] (Abb. 38)

234 Einsatz elektronischer Datenverarbeitungsanlagen

Die Berechnung von Netzwerken bis zu etwa 150 Aktivitäten ist auch ohne den Einsatz einer elektronischen Datenverarbeitungsanlage wirtschaftlich vertretbar.[2] Werden neben der Zeitanalyse auch noch Kosten- und Kapazitätsgesichtspunkte in die Überlegung mit einbezogen, so daß das Aufstellen von Alternativplänen erforderlich wird, dann ist die Verwendung einer Datenverarbeitungsanlage meist günstiger als eine manuelle Berechnung. Da neben der Netzwerkplanung auch andere Bereiche im Baubetrieb einer elektronischen Datenverarbeitung zugänglich sind, wie z.B. Statik, Lohnbuchhaltung und Bauabrechnung, ist für größere Baubetriebe eine eigene Rechenanlage oder die Benutzung eines Service-Rechenzentrums zweckmäßig.[3] Wie die folgenden Überlegungen zeigen sollen, ist es jedoch auch für einen Baubetrieb möglich, ohne Computer Zeit-, Kosten- und Kapazitätspläne mit Hilfe der Netzwerkmethode aufzustellen und zu optimieren.

24 Struktur- und Zeitanalyse

241 Auflistung der einzelnen Vorgänge

Soll ein Bauvorhaben mit Hilfe der Netzwerkmethode geplant und überwacht werden, so ist in der ersten Planungsphase die Struktur des Bauprojektes, d.h. die technologische Verknüpfung der einzelnen Arbeits-

---

1) Vergl. Gabriel, W.: a.a.O., S. 89

2) Vergl. Miller, R.W.: a.a.O., S. 71

3) s. hierzu: Günther, B.: Bauabrechnungen im Ingenieurbau, Düsseldorf 1963 und Pfarr im Baubetriebsberater sowie Rüeg, M.: Betriebswirtschaftliche Einsatzplanung der elektronischen Datenverarbeitung in der Unternehmung. In: Industrielle Organisation, 33. Jg., 1964, Heft 6, S. 251 ff.

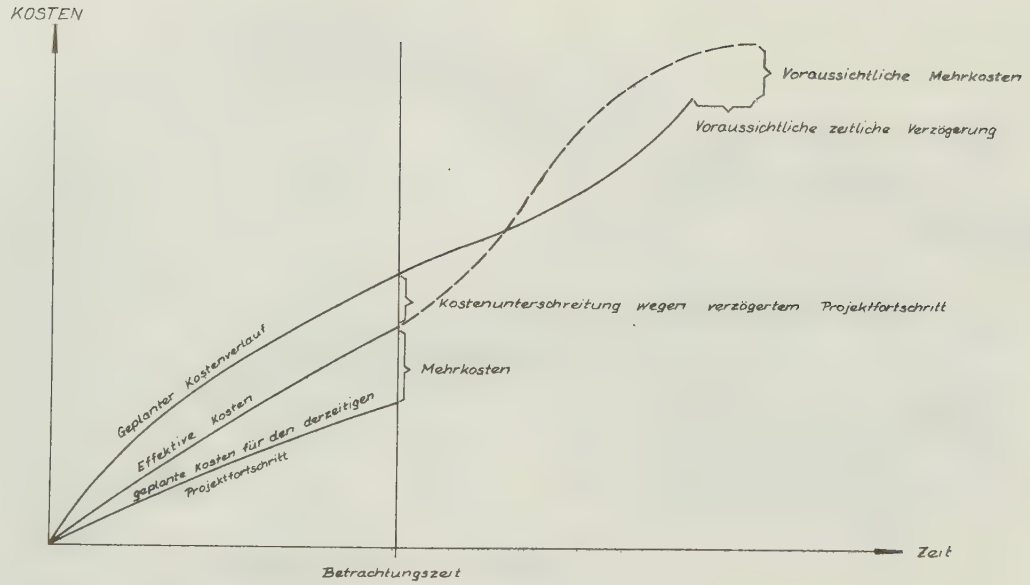

KOSTEN
Voraussichtliche Mehrkosten
Voraussichtliche zeitliche Verzögerung
Kostenunterschreitung wegen verzögertem Projektfortschritt
Mehrkosten
Geplanter Kostenverlauf
Effektive Kosten
geplante Kosten für den derzeitigen Projektfortschritt
Zeit
Betrachtungszeit

Abb. 38

vorgänge zu bestimmen. Zuerst ist eine Liste aufzustellen, in der alle Arbeiten und Vorgänge aufgezählt werden, die zur Durchführung des Bauprojektes erforderlich sind.[1] Das Auflisten der einzelnen Vorgänge kann unter Verwendung der Kalkulationsunterlagen erheblich erleichtert werden, da dem Leistungsverzeichnis eine Bauablaufbeschreibung zugrunde liegt. Ob man hierbei jede Position des Leistungsverzeichnisses einzeln aufführt oder mehrere zu einem Vorgang zusammenfaßt, ist eine Tatfrage. Meist wird es für den ersten Entwurf zweckmäßig sein, eine zusammengesetzte Aktivität (s. unter 12124) für eine Gruppe verwandter Leistungspositionen zu verwenden, so daß sich z.B. folgende Liste ergibt:

- Planung
  Statik und sonstige Berechnungen
  Materialbestellungen
  Baustelleneinrichtung
  Aushub der Baugrube
  Kanalisation
  Aushub der Fundamente
  Betonierung der Fundamente
  Abbinden der Fundamente
  Mauern der Kellerwände (innen und außen)
  Einschalen der Kellerdecke
  Anbringen des Isolierputzes
  Hinterfüllung der Kellerwände
  Betonieren der Kellerdecke
  Abbinden der Kellerdecke
  . . . . . .
  . . . . . .
  . . . . . .
  Bauabnahme -

242 Netzwerkkonstruktion

Sind alle Vorgänge aufgelistet, so ist unter Heranziehung der Bauleitung der gedachte technologische Ablauf und somit die Reihenfolge der Aktivitäten festzulegen. Fängt man hierbei mit dem Projektbeginn an (s. hierzu 123) und stellt sich für jede Aktivität die Fragen:

1) Ein größeres Beispiel - "Neubau eines Kasernenkomplexes aus Fertigteilen" - hierzu findet sich im Anhang.

1. Welcher Vorgang kommt unmittelbar vorher zur Ausführung?
2. Welcher Vorgang folgt unmittelbar nachher?
3. Welcher Vorgang könnte unmittelbar gleichzeitig ausgeführt werden?,

so ergibt sich für die obige Auflistung nachfolgender möglicher Netzwerkausschnitt. (s. Abb. 39)[1)]

243 Berechnung des Netzes

Hat man die Struktur des Projektes durch ein Netzwerk festgelegt, so folgt in der zweiten Planungsphase die Zeitanalyse des Bauprojektes. Die Zeitschätzungen für die Dauer der einzelnen Verrichtungen erhält die Planungsstabstelle aus der Kalkulationsabteilung. Anhand dieser Planwerte sind die Start- und Schlußzeiten der einzelnen Aktivitäten, die Gesamtdauer des Projektes, die Schlupfzeiten und der kritische Weg zu bestimmen. Hierzu soll ein Algorithmus erläutert werden, der es ermöglicht, die einzelnen Zeitberechnungen zu vereinfachen, so daß es auch bei komplexen Bauvorhaben möglich ist, die Zeitanalyse manuell - ohne die Verwendung von elektronischen Datenverarbeitungsanlagen - durchzuführen.[2)] Man geht hierbei von der Überlegung aus, daß sich jedes Netzwerk auch in Form einer Matrix darstellen läßt.

---

1) Ein ausführliches Beispiel hierzu s. im Anhang.

2) s. hierzu Weber, K.: Planung mit CPM: a.a.O., S. 6 ff und Wagner, G.: PERT und CPM als Planungsinstrumente der Bauindustrie, a.a.O., S. 7 ff; Clarke, R.W.: An Introduction to Critical Path Analysis, Stanford 1961, S. 47 sowie Thumb, N.: Netzplantechnik, Zeitschrift für wirtschaftliche Fertigung, 1964, Heft 6, S. 296

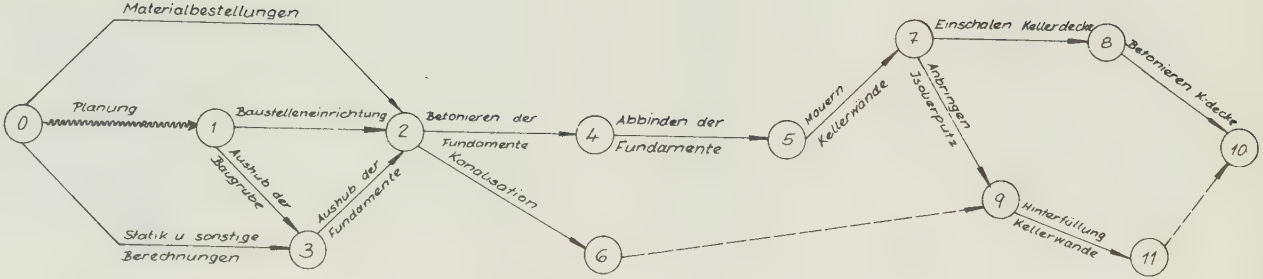

Materialbestellungen
Planung
Baustelleneinrichtung
Betonieren der Fundamente
Abbinden der Fundamente
Mauern Kellerwände
Einschalen Kellerdecke
Betonieren K-decke
Anbringen Isolierputz
Aushub der Baugrube
Aushub der Fundamente
Kanalisation
Statik u. sonstige Berechnungen
Hinterfüllung Kellerwände
0
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11

Abb. 39

Ist nachfolgendes Netzwerk mit den geplanten Aktivitätsdauern gegeben (s. Abb. 40),

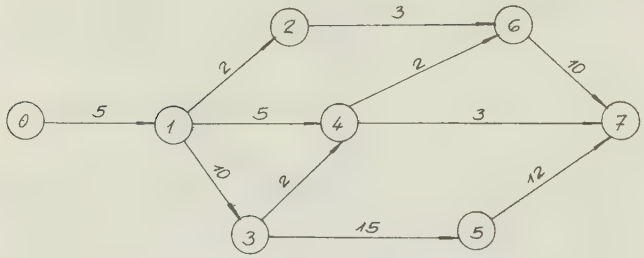


Abb. 40

so werden diese Grunddaten in eine Matrix eingetragen (s. Abb. 41). Man findet hierbei die jeweilige Dauer der Aktivität Y(i,j) in den entsprechenden Feldern (i-Zeile, j-Spalte) oberhalb der Diagonalen.

i \ j	0	1	2	3	4	5	6	7	$t_i^{(0)}$
0		5							0
1			2	10	5				5
2							3		7
3					2	15			15
4							2	3	17
5								12	30
6								10	19
7									42
$t_j^{(1)}$	0	5	29	15	30	30	32	42	

Abb. 41

Aus obiger Matrix folgt, daß vom Ereignis 1 drei Akti-

vitäten ausgehen, die zu den Ereignissen 2, 3 und 4 führen. Die zugehörige Dauer der Aktivitäten beträgt 2,10 und 5 Zeiteinheiten.

Aus dieser Grundmatrix werden zunächst die frühestmöglichen Startzeitpunkte $t_i^{(o)}$ bestimmt. Man beginnt zeilenweise zu rechnen (von o - n) und sucht für jeden Zeilenwert i die Spalte j mit der gleichen Ergebniskennziffer auf (i-Zeile = j-Spalte).
Dann bildet man für jedes Glied dieser Spalte zeilenweise die Summe aus diesem Glied und dem zugehörigen Zeilenwert in der $t_i^{(o)}$-Spalte. Der größte Wert der Zeilensummen ist der gesuchte $t_i^{(o)}$-Wert.
Für obiges Beispiel gilt:

Zeile i = o, Spalte j = o : keine Glieder in der Spalte, so daß $t_o^{(o)} = 0$

Zeile i = 1, Spalte j = 1 : in der 1-Spalte steht nur die Aktivität Y(0,1)= 5. Für dieses Glied ist die Summe mit dem zugehörigen Zeilenwert in der $t_i^{(o)}$-Spalte zu bilden. $Y(0,1) + t_o^{(o)} = 5 + 0 = 5 = t_1^{(o)}$

Zeile i = 2, Spalte j = 2 : in dieser Spalte steht gleichfalls nur ein Wert. Die entsprechende Summe lautet: $Y(1,2) + t_1^{(o)} = 5 + 2 = 7 = t_2^{(o)}$

Zeile i = 3, Spalte j = 3 : $Y(1,3) + t_2^{(o)} = 10 + 5 = 15 = t_3^{(o)}$

Zeile i = 4, Spalte j = 4 : in dieser Spalte stehen zwei Glieder (Y(1,4) = 5, Y(3,4) = 2), so daß zwei Summen zu bilden sind: $Y(1,4) + t_1^{(o)} = 5 + 5 = 10$

$Y(3,4) + t_3^{(o)} = 2 + 15 = 17.$

Dieser Wert (17) ist der zeitlängste zum Ereignis 4 und wird bei $t_4^{(o)}$ eingetragen.

Entsprechend ergibt sich für $t_5^{(o)} = 30$, $t_6^{(o)} = 19$ und für den Terminus $t_7^{(o)} = 42$.
Das Projekt kann somit - ceteris paribus - frühestmöglich nach 42 Zeiteinheiten beendet werden.

Im Anschluß an die $t_i^{(o)}$-Werte werden die spätestmöglichen Endtermine $t_j^{(1)}$ errechnet. Hierzu geht man vom Terminus, $t_7^{(1)} = t_7^{(o)} = \lambda$ aus und subtrahiert von diesem Zeitwert den zeitlängsten Weg zum jeweiligen Ereignis. Ein einfacher Algorithmus vereinfacht auch hier den Rechengang. Man arbeitet in der Matrix - im Gegensatz zur $t_i^{(o)}$ - Bestimmung - von rechts nach links und sucht für jede Spalte (von n—o) die entsprechende Zeile mit der gleichen Ergebniskenn-

Ziffer (j = i). Für jeden Wert (= Aktivitätsdauer) in dieser Zeile wird in der $t_j^{(1)}$ - Zeile der zugehörige Spaltenwert ermittelt. Von diesem wird die jeweilige Aktivitätsdauer subtrahiert. Das niedrigste Subtraktionsergebnis der Zeilenwerte ist der gesuchte $t_j^{(1)}$ - Wert.

Für obiges Beispiel errechnet man vom Projektende ausgehend:

$t_7^{(1)} = t_7^{(o)} = \lambda = 42$

$t_6^{(1)} = t_7^{(1)} - Y_{6,7} = 42 - 1o = 32$

$t_5^{(1)} = t_7^{(1)} - Y_{5,7} = 42 - 12 = 3o$

Zum Ereignis 4 führen zwei Wege zurück und zwar $Y_{7,4}$ und $Y_{6,4}$. Für $t_4^{(1)}$ folgt über $Y_{7,4}$ nach obigem Rechenschema:

$$t_4^{(1')} = 42 - 3 = 39$$

über die Aktivität $Y_{6,4}$:

$$t_4^{(1'')} = 32 - 2 = 3o.$$

Dies ist der zeitlängste Weg vom Terminus zu Ereignis 4 und bestimmt deshalb den spätesterlaubten Endtermin $t_4^{(1)} = 3o$.

Entsprechend ergibt sich für $t_3^{(1)} = 3o - 15 = 15$

$t_2^{(1)} = 32 - 3 = 29$; $t_1^{(1)} = 15 - 1o = 5$;

$t_o^{(1)} = 5 - 5 = O$.

Sind die frühestmöglichen Startzeitpunkte ($t_i^{(o)}$) und spätesterlaubten Endtermine ($t_j^{(1)}$) aller Aktivitäten bestimmt, so können hieraus die übrigen Zeitwerte aufgrund nachfolgender Beziehungen errechnet werden:[1)]

1) siehe Abschnitt 13

Frühestmöglicher Abschluß: $t_j^{(o)} = t_i^{(o)} + Y_{i,j}$

Spätestmöglicher Beginn: $t_i^{(1)} = t_j^{(1)} - Y_{i,j}$

Kritische Aktivität: $t_i^{(o)} = t_i^{(1)}$;

$t_j^{(o)} = t_j^{(1)}$

Gesamtschlupf: $Sg = t_j^{(1)} - t_i^{(o)} - Y_{i,j}$

Freier Schlupf: $Sf = t_j^{(o)} - t_i^{(o)} - Y_{i,j}$

Unabhängiger Schlupf: $Su = t_j^{(o)} - t_i^{(1)} - Y_{i,j}$

Interferierender Schlupf: $Si = t_j^{(1)} - t_j^{(o)}$

Nachfolgendes Tableau faßt die für obiges Beispiel berechneten Zeitwerte zusammen.[1] Eine Beschränkung auf die Berechnung des Gesamtschlupfes erscheint hierbei sinnvoll, da für einen Baubetrieb der zusätzliche Rechenaufwand für die Bestimmung von freiem-, unabhängigem- und interferierendem Schlupf nicht erforderlich ist.[2]

---

1) Ein ausführliches praktisches Beispiel für die manuelle Zeitberechnung befindet sich im Anhang.

2) Vergl. Waldron, A.J.: Fundamentals of Project Planning and Control., 2. Aufl. v.J. 1963, S. 39 schreibt hierzu: "The deterministic system of Critical Path also has several other categories of float: Free Float Independent Float and Interfering Float. Again, these are mathematically valid numbers, but of almost no use to a manager in his decision making position."

I	II	III	IV	V = II + IV	VI = III - IV	VII = III - II	VII
i - j	$t_i^{(0)}$	$t_j^{(1)}$	y, i', j	$t_j^{(0)}$	$t_j^{(1)}$	S ges.	kritisch
0 - 1	0	5	5	5	0	0	X
1 - 2	5	29	2	7	27	22	
1 - 3	5	25	10	15	5	0	X
1 - 4	5	30	5	10	25	20	
2 - 6	7	32	3	10	29	22	
3 - 4	15	30	2	17	13	13	
3 - 5	15	30	15	30	15	0	X
4 - 6	17	32	2	19	30	13	
4 - 7	17	42	3	20	39	12	
5 - 7	30	42	12	42	30	0	X
6 - 7	19	42	10	29	32	13	

Abb. 42

Eine besondere Bedeutung kommt den Zentralereignissen (Meilensteinen) in der Zeitplanung zu. Gerade im Baubetrieb sind vielfach Zeitpunkte von außen vorgegeben, zu welchen ein bestimmter Projektfortschritt erreicht sein soll. Da bei zeitlicher Überschreitung der Zentralereignisse meist nicht unerhebliche Konventionalstrafen drohen, betont man in der Praxis der Netzplantechnik die Wichtigkeit dieser Termineinhaltung dadurch, daß man die Meilensteine direkt mit dem Ursprung und dem Terminus des Netzwerkes verbindet, so daß diese Zusatzaktivitäten (milestone restraints) zu kritischen Aktivitäten werden bzw. werden können.[1] Ist folgendes einfaches Netzwerk gegeben (Abb. 43), dann führt der

1) Vergl. Waldron, A.J.: Fundamentals of Project Planning and Control, a.a.O., S. 56 ff.
Weber, K., Planung mit CPM und PERT, a.a.O., S. 234 f.
Christensen, B.M., Network Models ...., a.a.O., S. 4 f. und 22 ff.
GE 225 Application ...., a.a.O., S. 51 ff.

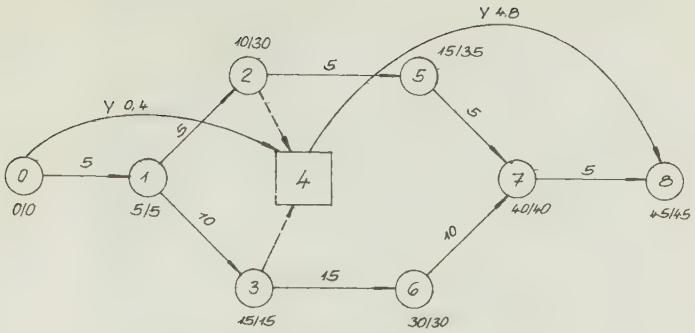


Abb. 43

kritische Weg - wenn man zunächst von dem Meilenstein (4) absieht - über die Ereignisse O, 1, 3, 6, 7 und 8. Sollen nun spätestens zu einem bestimmten Zeitpunkt x die Ereignisse 2 und 3 fertiggestellt sein, so wird diese Zeitspanne vom Planungszeitpunkt bis zum Zeitpunkt x durch eine Zusatzaktivität $Y_{o,4}$ dargestellt. Die Differenz zwischen $t_n^{(o)} = t_n^{(1)} = \lambda$ und der Zusatzaktivität $Y_{o,4}$ ist die Zeitdauer der zweiten Zusatzaktivität, die den Meilenstein mit dem Terminus verbindet. Für $Y_{4,8}$ ergibt sich der Wert $Y_{4,8} = t_n^{(1)} - Y_{o,4}$. Durch diesen Rechenschritt wird die Zusatzaktivität $Y_{4,8}$ zu einer kritischen Aktivität, und der Meilenstein (4) liegt auf einem kritischen Weg. Der Zeitwert für die Zusatzaktivität $Y_{4,8}$ wird meist noch um mindestens eine Zeiteinheit erhöht, um diesem neu geschaffenen kritischen Weg gegenüber anderen die Priorität einzuräumen.[1] Hierdurch wird

1) Vergl. Weber, K., Planung mit CPM und PERT, a.a.O., S. 234

$t_n^{(o)} > \lambda$ und nur der über den Meilenstein führende Weg ist noch kritisch, wobei die Zusatzaktivität $Y_{4,8}$ in jedem Fall kritisch ist. Für die Zusatzaktivität $Y_{o,4}$, die den Meilenstein mit dem Ursprung verbindet, gibt es hingegen drei Möglichkeiten. Es kann z.B. die zeitliche Dauer der Zusatzaktivität gleich der zeitlichen Länge der Wege $Y_{o,1} + Y_{1,3}$ sein, und zum Ereignis 4 führen zwei kritische Wege. Ist $Y_{o,4} > Y_{o,1} + Y_{1,3}$, so führt der kritische Weg über $Y_{o,4}$, und die Aktivitäten $Y_{o,1}$ und $Y_{o,3}$ bekommen einen Schlupf. Wenn hingegen die Zusatzaktivität $Y_{o,4} < Y_{o,1} + Y_{1,3}$ ist, ergibt sich hierfür eine Schlupfzeit. Diese ist jedoch irreführend, da der Meilenstein nach x Zeiteinheiten erreicht sein muß. Die Aktivitäten sind deshalb so lange durch Einsatz zusätzlicher Produktionsfaktoren zu verkürzen, bis $Y_{o,4} = Y_{o,1} + Y_{o,3}$.

25 Kostenoptimierung

251 Einführung und Problemstellung

Die Projektdauer wurde unter der Voraussetzung eines "normalen" Produktionsmitteleinsatzes errechnet. In der Zeitplanung bleiben somit Kostenüberlegungen unberücksichtigt. Die Notwendigkeit, diese in die Ablaufplanung mit einzubeziehen, ergibt sich aus dem Wirtschaftlichkeitsprinzip. Die Berücksichtigung der Kosten ist erforderlich für:

1. Die Bestimmung der Projektdauer mit den geringsten Gesamtkosten.

2. Die kostenoptimale Verkürzung der Projektdauer auf einen vorgegebenen Zeitpunkt.

Zu 1.: Ist mit Hilfe des kritischen Weges eine bestimmte Projektdauer errechnet, so kann nicht ex ante angenommen werden, daß diese gleichzeitig die Durchführungszeit mit den geringsten Projektkosten ist. Obgleich der Berechnung der Pro-

jektdauer ein "normaler" Produktionsmitteleinsatz und "normale" direkte Projektkosten zugrunde gelegt wurden - die im folgenden den minimalen direkten Projektkosten gleichgesetzt werden sollen -, ist es dennoch möglich, durch zusätzliche Beschleunigungskosten die Gesamtprojektkosten zu verringern. So konnte die Fertigungszeit eines Gebäudes um vier Monate beschleunigt werden, was zusätzlich direkte Kosten von $ 5o.ooo verursachte. Gleichzeitig wurden jedoch durch die Verkürzung monatlich $ 2o.ooo an indirekten Kosten eingespart, was per Saldo eine Kürzung der Gesamtkosten von $ 3o.ooo ergab.[1] Darüber hinaus sind noch evtl. Opportunitätskosten - wie Mietausfall - zu berücksichtigen.

Zu 2.: Die Annahme, daß der über den kritischen Weg errechnete Termin $t_n^{(o)}$ dem vorgegebenen Termin entspricht, ist meist nicht realisierbar. Wenn $\lambda > t_n^{(o)}$, kann eine Zeitkorrektur durch eine Verschiebung des Startzeitpunktes um $\lambda - t_n^{(o)}$ erfolgen. Ist hingegen $\lambda < t_n^{(o)}$, so kann eine Kürzung der Projektdauer nur realisiert werden, wenn die Aktivitäten, die den kritischen Weg bestimmen, beschleunigt werden können. Dies ist meist möglich, womit jedoch vielfach eine Erhöhung der direkten Kosten verbunden ist. Die Kürzung einer Aktivitätsdauer kann durch zeitliche, quantitative, intensitätsmäßige oder qualitative Anpassung erfolgen. Es können Überstunden eingelegt, zusätzliche Arbeitskräfte und Maschinen eingesetzt, mit höheren Produktionsgeschwindigkeiten oder neuen Verfahren gearbeitet werden.

Eine optimale Projektzeit unter Berücksichtigung von Kosten und Gewinnen zu bestimmen, ist Ziel der dritten Netzwerkplanungsphase. Diese Problemstellung ist ein parametrisches lineares Programm, wobei die minimalen Kosten bzw. der maximale Nutzen eine Funktion der Dauer

1) Vergl. Mauchly, I.W.: Critical Path Scheduling, Chemical Engineering, April 16, 1962, S. 139 ff.

des Projektes sind. Lösungen dieser Aufgabe mit Hilfe der "primären Dualität" und der "Netzwerkfluß-Methode" sind u.a. von Fulkerson, Ford und Kelley entwickelt worden, worauf verwiesen wird.[1)]

---

1) Da diese Arbeit auf die praktische Anwendung der Netzwerkplanung ausgerichtet ist, erscheint eine Wiedergabe dieser O.R.-Verfahren in diesem Zusammenhang nicht sinnvoll, und der mathematisch interessierte Leser wird auf die einschlägige Literatur verwiesen.

Kelley, J.E.: Parametric Programming and the Primal Dual Algorithm., Operations Research, Vol. 7/No. 3, 1959, S. 327 ff.

Kelley, J.E.: Critical-Path Planning and Scheduling: Mathematical Basis; Journal of Op.Res., Vol. 9/No. 3, 1961, S. 296 ff.

Kelley, J.E.: Walker M.R.: Critical-Path Planning and Scheduling; Proceedings of the Eastern Joint Computer Conference, Boston, Dec. 1959, S.16o ff.

Fulkerson, D.R.: A Network Flow Computation For Project Cos Curves; Management Science Vol. 7/No. 2 Jan. 1961, S. 167 ff.

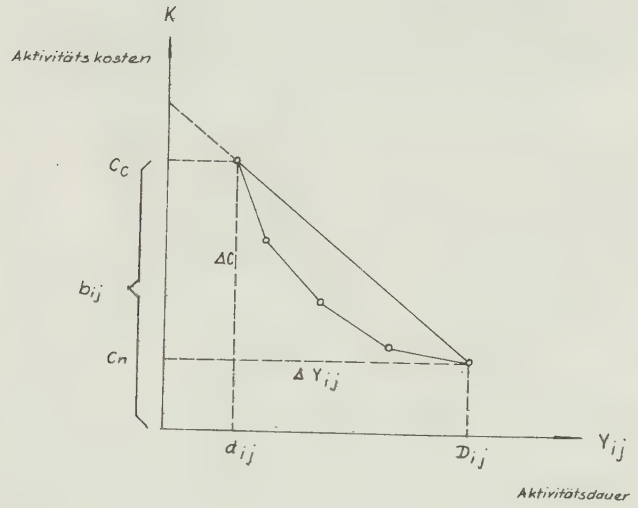
Fulkerson, D.R.: Ford, L.R.: A Simple Algorithm For Finding Maximal Network Flows and an Application To the Hitchcock Problem; Canadian Journal of Mathematics, Vol. 9/No. 2, 1957, S. 21o ff.

Ford, L.R., Fulkerson, D.R.: Flows in Networks, Princetown, New Yersey 1962

Roper, D.E.: Critical Path Scheduling; The Journal of Industrial Engineering, March-April 1964, S. 51 ff.

Zur kostenoptimalen Projektverkürzung bei PERT-Zeiten s. Bildson/Gillespie: Critical Path Planning-PERT Integration; Journal of Op. Res., Vol. 1o/No. 6, 1962, S. 9o9 ff.

Voraussetzung für die Bestimmung einer Projekt-Kosten-Kurve ist, daß die Aktivitäten und deren Verhalten bei Beschleunigung bekannt sind. Mögliche Zeitkürzungen der Aktivitäten bewirken meist ein Ansteigen der direkten Aktivitätskosten. Diese können in einem Zeit-Kosten-Diagramm eingetragen und durch eine Kostenkurve verbunden werden. (Abb. 44). Die Kurve ist als " a picewise linear, non increasing and convex function of $Y_{i,j}$ " charakterisiert. Ihr Verlauf hängt von den jeweiligen Beschleunigungsmöglichkeiten der einzelnen Aktivitäten und den daraus resultierenden Beschleunigungskosten ab.



D_{ij} = Normaldauer der Aktivität

d_{ij} = Zusammenbruchsdauer

C_n = Kosten bei Normaldauer

C_c = Kosten am Zusammenbruchspunkt

$\frac{\Delta c}{\Delta Y_{ij}}$ = Steigungsmaß der linear approximierten Kostenfunktion

Abb. 44

Zunächst sind für jede Aktivität die Kosten bei Normaldauer ($D_{i,j}$) - die den minimalen direkten Aktivitätskosten entsprechen sollen - zu bestimmen.

Im Anschluß an die Ermittlung der Kosten bei Normaldauer (normal duration) sind die Kosten bei Minimaldauer ($d_{i,j}$) (crash duration) festzusetzen.
Es gilt:

$$0 \leq d_{i,j} \leq Y_{i,j} \leq D_{i,j}$$

Da in der Praxis selten ausreichende Kostendaten vorhanden sind, um Stufenpläne aufzustellen, wird die obige konkave Zeit-Kosten-Kurve (s.Abb.44) durch eine Gerade mit dem Steigungsmaß $a_{i,j} = \frac{\Delta C}{\Delta Y_{i,j}}$ angenähert.

Theoretisch ist dies problematisch, da hierbei unberücksichtigt bleibt, daß "jumps from one short - run curve to another" erfolgen.[1] Praktisch erscheint diese Näherungslösung ausreichend, zumal die Eingabedaten meist nur geschätzt werden können.[2] Das Steigungsmaß ($a_{i,j}$) ergibt sich aus:

$$a_{i,j} = \frac{C_n - C_c}{D_{i,j} - d_{i,j}} \geq 0$$

und die Gleichung der Kostengeraden lautet:

$$C_{i,j} = - a_{i,j} + (a_{i,j} D_{i,j} + C_n)$$

---

1) Vergl. Dean, J.: Cost structure of enterprises and break - even charts : The American Economic Review 38 (1948), S. 161

2) "We must estimate the "normal" and "crash" points. A linear relationship between these two points is generally sufficient to produce accetable results comparable to the accuracy of the data input. Where more accurate information is available, CPM can consider it if needed."
Cosinuke, W.: The critical path method. In: Gabriel N. Stilian and others: PERT - a new management planning and control, New York 1962, S. 152.

Setzt man im Anschluß an Kelley/Walker den Klammerausdruck $= b_{i,j}$ und $a_{i,j} \leq 0$,
so ist[1)]

$$C_{i,j} = a_{i,j} \; Y_{i,j} + b_{i,j} \; .$$

Diese Werte ($a_{i,j}$ und $b_{i,j}$), die die Kostenkurve charakterisieren, erhält man aus den Kosten-Zeit-Relationen bei Normal- und Minimaldauer der Aktivitäten. Ist für jede Aktivität der lineare Zusammenhang zwischen Dauer und Kosten aufgestellt, so sind die Voraussetzungen für die Berechnung einer kostenminimalen Projekt-Kosten-Funktion gegeben. Durch Summierung aller einzelnen Aktivitäts-Kostenfunktionen erhält man die gesamten direkten Projektkosten als eine Funktion der Dauer (λ):

$$K\ (\lambda) = \Sigma (a_{i,j} \; Y_{i,j} + b_{i,j}) \; ; \; (i,j \in P).$$

Dieser Ausdruck kann für unterschiedliche Werte von λ berechnet werden. Sind alle Aktivitäten mit ihrer Normaldauer ($D_{i,j}$) angesetzt, so bekommt man die absolut minimalen direkten Projektkosten. Das andere Extrem - die maximalen direkten Projektkosten - liegt vor, wenn alle Aktivitäten mit Minimalzeit (crash duration) durchgeführt werden. Dies ist jedoch nicht sinnvoll, da die gleiche Zeitverkürzung auch mit geringeren Beschleunigungskosten zu erzielen ist. So kann bei Aktivitäten, die einen ausreichenden Schlupf haben, auf eine Beschleunigung verzichtet werden. Ziel der Projektverkürzung ist es, von allen möglichen Projektzeiten - die zwischen diesen beiden Extremen liegen - die auszuwählen, bei denen eine bestimmte Projektzeit $\lambda_1, \; \lambda_2, \; \lambda_3, \lambda_m$ mit den geringsten direkten Projektkosten zu erreichen ist.

Es gilt somit:

$$K\ (\lambda) = \Sigma (a_{i,j} \; Y_{i,j} + b_{i,j}) \; ; \; (i,j \in P)$$

---

1) Vergl. Kelley/Walker, a.a.O., S. 165

unter den Nebenbedingungen

$$Y_{i,j} \leq t_j - t_i \quad ; \quad (i,j \in P)$$

$$t_o = 0$$

$$t_n = \lambda$$

zu minimieren, wobei für alle Scheinaktivitäten

$$a_{i,j} = d_{i,j} = D_{i,j} = 0$$

Ausgangspunkt einer schrittweisen Lösung ist eine "all-normal-solution", bei der alle $Y_{i,j} = D_{i,j}$, so daß der Wert $K(\lambda)$ für alle $\lambda \geq t_n^{(o)}$ optimal ist. Eine kostenoptimale Verkürzung der Projektzeit von der "all-normal solution" aus kann wie folgt beschrieben werden:[1]

1. Finde die Netzwerkstrecke, die zwischen i = 0 und j = n die größte zeitliche Ausdehnung hat. Dieser Pfad wird "main chain" genannt, und seine zeitliche Ausdehnung entspricht der Gesamtprojektdauer (λ). Eine Verkürzung von λ ist nur über eine Reduzierung des "main chain" möglich, von dem eine (oder einige) kritische Aktivität(en) zu beschleunigen ist (sind).

2. Wird das Kostenminimierungsprinzip verfolgt, so sind zunächst die Aktivitäten zu kürzen, bei denen die Zeitreduktion mit dem geringsten Kostenzuwachs erreicht werden kann (min. $a_{i,j}$). Diese Aktivitäten sind soweit als möglich zu beschleunigen, wobei die Zusammenbruchsdauer ($d_{i,j}$) die unterste Begrenzung angibt. Entsteht durch diese Beschleunigung bereits vor Erreichen der Zusammenbruchsdauer ein neuer kritischer Weg, so darf die Wertreduktion nur bis zu dem entsprechenden $D_{i,j} > Y_{i,j} > d_{i,j}$ durchgeführt werden.

3. Diese Schritte sind solange zu wiederholen, bis keine weitere zeitliche Verkürzung der Projektdauer möglich ist.

Als Endergebnis erhält man eine stückweise lineare, konkave "Projekt-Kosten-Kurve" (s.Abb. 45)

---

1) Vergl. Clarke, W.R.: a.a.O., S.5o f., s. auch Weber, K.: a.a.O., S. 9

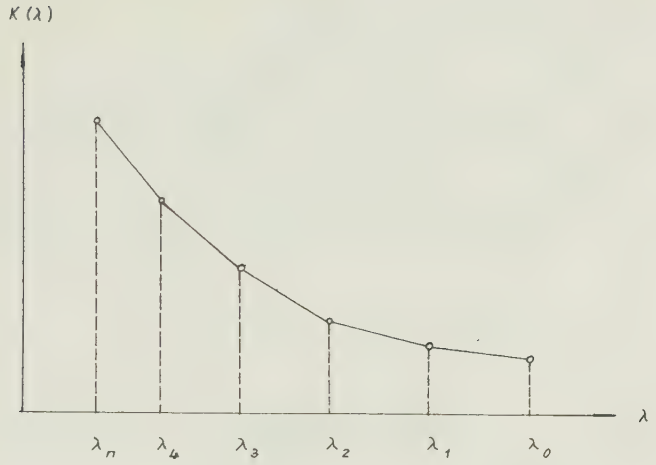


Abb. 45

Nachfolgendes Beispiel soll diese Zusammenhänge verdeutlichen.[1] Aus Abb. 46 und Abb. 47 folgt, daß vom Startpunkt 0 zum Terminus 7 Wege führen. Laufen alle Aktivitäten mit Normaldauer (all normal solution), so führt der zeitlängste Weg über die kritischen Aktivitäten (0,1), (1,4), (4,5), (5,6) und (6,8) und die Projektdauer beträgt 46 Wochen.

---

1) entnommen und berichtigt, Weber, K.: a.a.O., S. 1o ff.

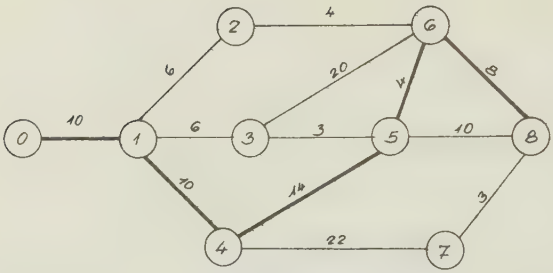


Abb. 46

AKTIVITÄT	Kritischer Weg a	Kritischer Weg b	NORMALDAUER (WOCHEN)	MINIMALDAUER (WOCHEN)	Variabele Gesamtkosten DM: Normaldauer	Variabele Gesamtkosten DM: Minimaldauer	VARIABLE DURCHSCHNITTSKOSTEN (DM PRO WOCHE)
0,1	*	·	10	5	1 500	3 000	300
1,2	·	·	6	3	1 700	2 900	400
1,3	·	·	6	4	2 700	3 300	300
1,4	*	·	10	5	3 500	7 000	700
2,6	·	·	4	1	1 500	3 000	500
3,5	·	·	3	1	3 000	3 600	300
3,6	·	·	20	10	7 000	12 000	500
4,5	*	·	14	7	4 000	8 200	600
4,7	·	·	22	15	5 000	9 900	700
5,6	*	·	4	3	2 000	3 000	1 000
5,8	·	·	10	5	5 000	10 000	1 000
6,8	*	·	8	8	7 000	7 000	—
7,8	·	·	3	2	2 400	3 200	800
Total			46	28	46 300	76 100	—

Grunddaten

Abb. 47

Dieser Projektlänge (46 Wochen) entsprechen direkte Projektkosten von 46.300 DM. Werden alle Aktivitäten bis zur Zusammenbruchszeit beschleunigt (all-crash solution), so entstehen bei einer minimalen Projektdauer von 28 Wochen 76.100 DM direkte Projektkosten (s. Abb. 47), Bei einer sukzessiven Reduktion der Projektdauer ergibt sich jedoch - was noch an diesem Beispiel zu zeigen ist - im Gegensatz zur undifferenzierten all-crash solution ein wesentlich geringerer Betrag an direkten Projektkosten.

Aus den Zeit- und Kostendifferenzen (s. Abb. 47) sind zunächst für jede Aktivität die variablen Durchschnittskosten (= Grenzkosten) zu bestimmen. Aus obiger Gleichung für den Kostenanstieg

$$a_{ij} = \frac{C_c - C_n}{D_{ij} - d_{ij}}$$ folgt dann z. B. für

Aktivität $Y_{O,1}$: $\frac{3000-1500}{10-5} = 300.$

Die weitere Berechnung der Projektverkürzung basiert auf den Grunddaten der Tabelle 47. Da nur die Beschleunigung der kritischen Aktivitäten sich auf eine Reduzierung von λ auswirkt, wird aus diesen diejenige herausgesucht, die bei einer Beschleunigung/Zeiteinheit den geringsten Kostenzuwachs verursacht. Für obiges Beispiel wird die Aktivität $Y_{O,1}$ auf 5 Wochen gekürzt. Hieraus resultiert eine Kostensteigerung von 1.500 DM auf 47.800 DM direkte Projektkosten und eine Gesamtdauer von 41 Wochen (s. Abb. 48). Darüber hinaus werden alle 7 Wege, die von O zum Terminus führen, um 5 Wochen reduziert.

Für eine weitere Verkürzung des kritischen Weges bietet sich die Aktivität (4,5) an. Diese kann von 14 auf 7 - um 7 Wochen - beschleunigt werden. Unter Beachtung obiger Leitsätze kann jedoch die Aktivität (4,5) zunächst nur um 2 Wochen gekürzt werden, da bei einer Dauer der Aktivitäten (1,4), (4,5) und (5,6) von 26 Wochen die Aktivitäten (1,3) und (3,6) gleichfalls kritisch werden. Nach Reduktion der Aktivität (4,5) um 2 Wochen beträgt die Projektdauer 39 Wochen, wobei die direkten Projektkosten auf 49.000 DM angestiegen sind. Zu beachten ist, daß jetzt zwei kritische Wege bestehen. Neben dem "main chain" über die Aktivitäten (O,1), (1,4), (4,5), (5,6) und (6,8) führt ein zweiter kritischer Weg über die Aktivitäten

Aktivität	kritischer Weg		Aktivitäts-Projektdauer (Wochen)		variable Gesamtkosten DM
	a	b	neue Situation	Änderungen gegenüber Abb. 47	
0,1	*	*	5	-5	3 000
1,2	·	·	6	·	1 700
1,3	·	*	6	·	2 700
1,4	*	·	10	·	3.500
2,6	·	·	4	·	1 500
3,5	·	·	3	·	3 000
3,6	·	*	20	·	7 000
4,5	*	·	12	- 2	5 200
4,7	·	·	22	·	5 000
5,6	*	·	4	·	2 000
5,8	·	·	10	·	5000
6,8	*	*	8	·	7000
7,8	·	·	3	·	2400
Total			39	- 7	49 000

Abb. 48

(0,1), (1,3), (3,6) und (6,8). Eine weitere Reduktion von λ erfordert, daß beide kritischen Wege beschleunigt werden, da eine Beschleunigung nur eines kritischen Weges lediglich eine Kostenerhöhung, jedoch keine Verkürzung von λ bewirkt.[1] Auf dem "main chain" werden die Aktivitäten (4,5) von 12 auf 7 Wochen (+ 3.000 DM) und (1,4) von 10 auf 5 Wochen (+ 3.500 DM) beschleunigt. Beim zweiten kritischen Weg werden die Aktivitäten (1,3) um 2 Wochen (+ 600 DM) und (3,6) um 10 Wochen (+ 5.000 DM) reduziert. Diese Maßnahmen bewirken eine Kürzung der Projektdauer um 10 Wochen auf 29 Wochen, wobei sich für die neue Situation direkte Projektkosten in Höhe von 61.100 DM ergeben. (s. Abb. 49)

Soll die endgültige Projektzeit 29 Wochen betragen, so kann die Aktivität (3,6) wieder um 2 Wochen ausgedehnt werden. Hierdurch wird keine Verlängerung von λ,

1) Diesen Fehler macht Weber, K.; wenn er glaubt, daß er bei seinem Beispiel durch Beschleunigung der Aktivität (1,3) um 2 Wochen eine Projektverkürzung auf 37 Wochen bewirken kann.

Aktivität	Kritischer Weg		Aktivitäts-Projektdauer (Wochen)		Variable Gesamtkosten DM
	a	b	neue Situation	Änderungen gegenüber Abb. 48	
0,1	*	·	5	·	3 000
1,2	·	·	6	·	1 700
1,3	·	·	4	- 2	3 300
1,4	*	·	5	- 5	7 000
2,6	·	·	4	·	1 500
3,5	·	·	3	·	3 000
3,6	·	·	10	- 10	12 000
4,5	*	·	7	- 5	8 200
4,7	·	·	22	·	5 000
5,6	*	·	4	·	2 000
5,8	·	·	10	·	5 000
6,8	*	·	8	·	7 000
7,8	·	·	3	·	2 400
Total			29	- 10	61 100

Abb. 49

jedoch eine Kostenminderung auf 60.100 DM erreicht, Eine weitere optimale Kontraktion (der Tabelle 49) auf 28 Wochen ist durch folgende Maßnahmen zu erreichen:

Beschleunigung von (5,6) um eine Woche,
Ausdehnung von (3,6) um eine Woche.
Diese letzte mögliche Projektverkürzung auf 28 Wochen erfordert direkte Kosten von 61.600 DM. (s. Abb. 50) Gegenüber der all-crash solution - bei der alle Aktivitäten bis zum Zusammenbruchspunkt beschleunigt werden - ergeben sich bei gleicher Projektzeit Minderkosten von 76.100 DM ./. 61.600 DM = 19.500 DM.

Sind die direkten Projektkosten für die einzelnen Zeitintervalle bestimmt, so kann durch Gegenüberstellung mit den indirekten Kosten und etwaigen Opportunitätskosten das Gesamtprojektkostenminimum bestimmt werden.

Aktivität	Kritischer Weg		Aktivitäts - Projektdauer (Wochen)		Variable Gesamtkosten DM
	a	b	neue Situation	Änderungen gegenüber Abb. 49	
0,1	*	*	5	·	3 000
1,2	·	·	6	·	1 700
1,3	·	*	4	·	3 300
1,4	*	·	5	·	7 000
2,6	·	·	4	·	1 500
3,5	·	·	3	·	3 000
3,6	·	*	11	+1	11 500
4,5	*	·	7	·	8 200
4,7	·	·	22	·	5 000
5,6	*	·	3	-1	3 000
5,8	·	·	10	·	5 000
6,8	*	*	8	·	7 000
7,8	·	·	3	·	2 400
Total			28	- 1	61 600

Abb. 50

Kostet z.B. jede Verzögerung der Fertigstellung 300 DM/Woche (Opportunitätskosten, Konventionalstrafe) und beträgt der Anteil der indirekten Projektkosten 100 DM/Woche (15.100 - 16.900 DM), so ist bei einer Projektdauer von 41 Wochen ein Gesamtprojektkostenminimum von 68.100 DM gegeben. (s. Abb. 51 u. Abb. 52)

Projekt-dauer (Wochen)	Direkte Gesamtkosten	Indirekte Kosten	Opportunitäts-kosten	Total kosten
28	61 600	15 100	—	76 700
29	60 100	15 200	300	75 600
34	54 100	15 700	1 800	71 600
37	50 800	16 000	2 700	69 500
39	49 000	16 200	3 300	68 500
41	47 800	16 400	3 900	68 100
46	46 300	16 900	5 400	68 600

Abb. 51

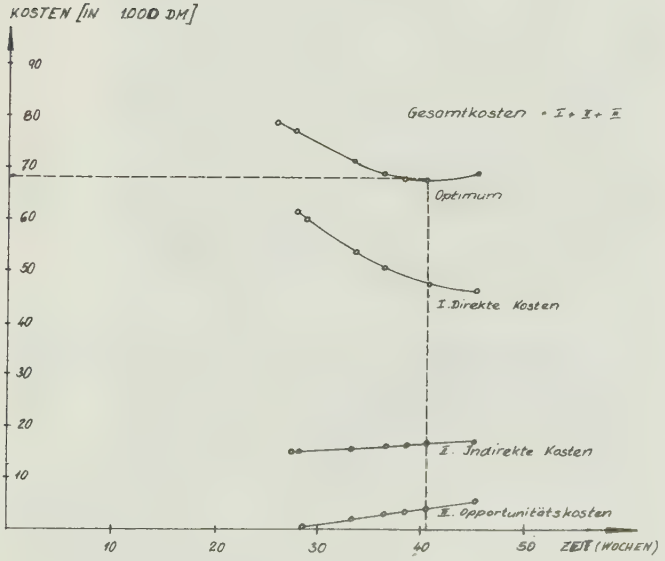


Abb 52

252 Voraussetzungen für die Anwendung der Kostenoptimierung im Baubetrieb

Will ein Baubetrieb zusätzlich zur Zeitplanung eine Kostenoptimierung mit Hilfe der Netzwerkplanung durchführen, so müssen drei Voraussetzungen erfüllt sein:

1. Bereitstellung der erforderlichen Eingabedaten.
2. Linear angenäherte Kostenverläufe.
3. Berechnungsmöglichkeiten der Alternativpläne.

Zu 1.: Erforderliche Eingabedaten für die Berechnung einer optimalen Projekt-Kosten-Kurve sind für jede Aktivität: Normaldauer, Kosten bei Normaldauer, Zusammenbruchsdauer und Kosten beim Zusammenbruchspunkt. Ebenso wie die Normaldauer einer Aktivität können die damit verbundenen direkten Kosten in der Kalkulationsabteilung bereitgestellt werden. Dies wird für einen Baubetrieb meist ohne Schwierigkeiten möglich sein, da bei der Kalkulation eines Bau-Projektes ohnehin die direkten Kosten positionsweise berechnet werden müssen. Zusätzliche Überlegungen sind jedoch für die Erfassung von Zusammenbruchszeit und - dauer nötig. Zur Schätzung dieser Werte sind sowohl genaue organisatorische als auch technologische Kenntnisse über die Beschleunigungsmöglichkeiten der einzelnen Aktivitäten erforderlich, wobei der betriebliche Beschäftigungsgrad und die daraus resultierenden Kapazitätsbeschränkungenzu beachten sind. Erleichternd wirkt sich aus, daß "bei Bauprojekten rund 60 % aller Aktivitäten im Hinblick auf eine optimale Gestaltung der gesamten Projektdauer in ihrer normalen Ausdehnung nicht zu verändern sind; in den restlichen Fällen muß die minimale Aktivitätsdauer ($d_{i,j}$) zudem nur sehr selten realisiert werden".[1] In Anlehnung an Cosinuke erscheint es sinnvoll, nur einen "step approach" vorzunehmen und hierbei "that portion of the project cost curve that is necessary and applicable to the project" zu entwickeln. Eine Beschleunigung von kri-

1) Weber, K.: a.a.O., sowie Cosinuke: a.a.O., S. 155

tischen Aktivitäten erfolgt hierbei solange, bis "one discovers that the over-all project cost curve develops a tendency to increase in cost, the computations can stop because the optimum duration and costs for the over-all project have been reached".[1] Dieser Punkt, wo die Gesamtkostenkurve ansteigt, wird im Baubetrieb meist nach wenigen Beschleunigungsmaßnahmen erreicht sein, da der Anstieg der indirekten Kosten - im Verhältnis zu den direkten Kosten - besonders bei den im Baubetrieb vorherrschenden lohnintensiven Arbeiten - gering ist. Die Fixierung vieler Bauaktivitäten auf ihre Normaldauer ist weniger technologisch - wie etwa das Abbinden beim Beton - als wirtschaftlich bedingt. So ist es meist nur mit großem Mehraufwand möglich, die für eine Beschleunigungsmaßnahme erforderlichen Produktionsfaktoren bereitzustellen. Dies umsomehr, als bestimmte Bauarbeiten nur mit Hilfe von Spezialmaschinen und geschulten Fachkräften durchgeführt werden können. Hohe Beschleunigungskosten ergeben sich weiterhin durch eine starke Abhängigkeit der einzelnen Leistungsquerschnitte voneinander. Hat man z.B. an einem Wohnblock 20 Maurer eingesetzt, deren Materialzufuhr durch einen Kran erfolgt, so können 10 weitere Maurer nur dann produktiv werden, wenn ein zweiter Kran auf - gestellt wird, da ein Kran mit der Materialbereitstellung für 20 Maurer ausgelastet ist. Das dennoch Projektverkürzungen für einen Baubetrieb sinnvoll sein können, ist weniger durch die indirekten Kosten, als durch die Opportunitätskosten - wie z.B. hohe Konventionalstrafen oder Gewinnentgang - bedingt.

Zu 2.: Sowohl bei zeitlicher, intensitätsmäßiger, als auch quantitativer Anpassung kann bei einem Baubetrieb eine angenähert lineare Kostenkurve vorausgesetzt werden.[2] Sonderfälle,

1) Cosinuke: a.a.O., S. 155

2) Ausführlich hierzu: Ebel, H.-J.: Problematik des Winterbaues, Meisenheim 1966

die der im Abb. 53 wiedergegebenen Zeit-Kosten-Relation nicht folgen, können entsprechend berücksichtigt werden.

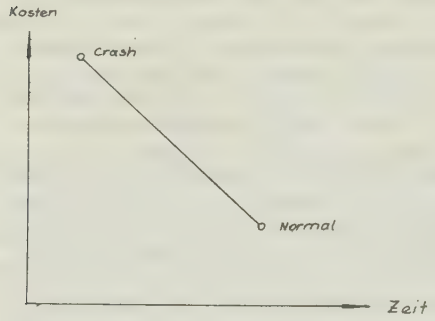


Abb. 53

Erfolgt z.B. die Beschleunigung von Normalzeit auf "crash" durch mehrere stark kostenungleiche Maßnahmen, so daß der Kurvenverlauf in Abb. 54 gegeben ist, so kann jeder Streckenzug gesondert berücksichtigt werden. In diesem Fall der "partly continuous time-cost relationship" sind für jedes Segment die jeweiligen Beschleunigungskosten zu setzen.

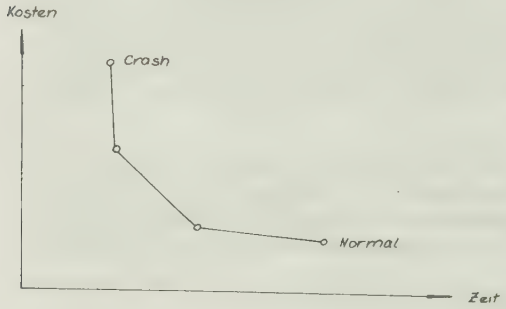


Abb. 54

Im Gegensatz zur zeitlichen, quantitativen und

intensitätsmäßigen Anpassung besteht bei qualitativer Anpassung - wie bei Verfahrensänderungen - kein kontinuierlicher Kurvenverlauf, so daß eine sukzessive Reduktion der Aktivität nicht möglich ist (s. Abb. 55). Dieser Fall ist z.B. im Erdbaubetrieb gegeben, wenn der Gleisbetrieb durch LKW's substituiert wird, Bagger durch Scraper ersetzt werden, oder im Hochbau der Aufzug durch einen Kran. Bei der Kostenoptimierung ist zu vermerken, daß für diese Tätigkeit eine Interpolation von Zeit und Kosten nicht möglich ist.

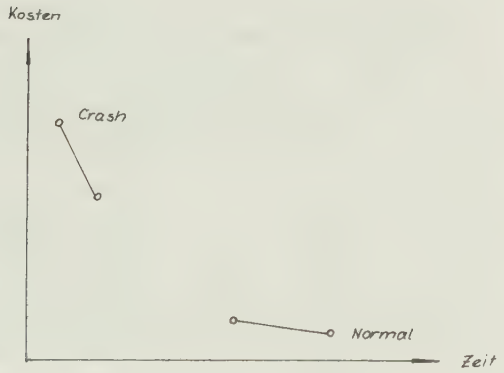


Abb. 55

Zu 3.: Wie bereits obiges einfaches Netzwerkbeispiel zeigt, ist die dort angewandte Probiertechnik zur Bestimmung der Projekt-Kosten-Kurve sehr zeitaufwendig und darüber hinaus auch fehleranfällig. Für größere Netzwerke wird es zweckmäßig sein, die Kostenoptimierung auf einer Datenverarbeitungsanlage durchführen zu lassen. Entsprechende Programme liegen vor und können auf eigenen Anlagen oder in Rechenzentren durchgerechnet werden. Aber auch

eine manuelle Berechnung ist, wie das nachfolgende Beispiel zeigen soll, möglich.[1]

253 Manuelle Berechnung der kostenoptimalen Projektdauer

Der nachfolgenden Berechnung der kostenoptimalen Projektdauer liegt das Netzwerkbeispiel aus Abb. 46 zugrunde. Es gilt hierfür folgende Ausgangstabelle (Abb. 56).

Aktivität	Normaldauer		Zusammenbruchdauer		Kostenanstieg je Zeiteinheit
	Zeit	Kosten	Zeit	Kosten	(DM / Woche)
0 - 1	10	1 500	5	3000	300
1 - 2	6	1 700	3	2900	400
1 - 3	6	2 700	4	3300	300
1 - 4	10	3 500	5	7000	700
2 - 6	4	1 500	1	3000	500
3 - 5	3	3 000	1	3600	300
3 - 6	20	7 000	10	12 000	500
4 - 5	14	4 000	7	8 200	600
4 - 7	22	5 000	15	9 900	700
5 - 6	4	2 000	3	3 000	1000
5 - 8	10	5 000	5	10 000	1000
6 - 8	8	7 000	8	7 000	–
7 - 8	3	2 400		3 200	800
Σ	46	46 300	28	76 100	–

Grunddaten

Abb. 56

1) Die Berechnung erfolgt in Anlehnung an: Fondahl, J.W.: A non-computer approach to the critical path method for the construction industry, 2. Aufl., Standford 1961.
Zur manuellen Berechnung einer optimalen Projektverkürzung siehe auch: Waldron, A.J.: Fundamentals of Project Planning and Control, 2. Aufl., Haddonfield, N.Y. 1963, S. 112 ff.

Bevor der Rechengang im einzelnen erläutert wird, sollen zuvor die hierfür erforderlichen Arbeitsblätter beschrieben werden.

Arbeitsblatt I (Abb. 57) ist eine Zusammenfassung der Ergebnisse, die auf den anderen Arbeitsblättern ermittelt wurden. Entsprechende Eintragungen erfolgen, wenn ein Rechenzyklus beendet ist, wobei jeder Rechenzyklus der Bestimmung eines Segmentes der Projekt-Kosten-Kurve dient. In der ersten Spalte stehen die Rechenzyklen. In die anschließenden Spalten werden die kritischen Aktivitäten mit dem geringsten Kostenanstieg eingetragen, die im jeweiligen Zyklus beschleunigt werden sollen. Die Beschleunigungsbegrenzungen für die jeweiligen kritischen Aktivitäten ergeben sich einmal aus der Zusammenbruchsdauer der Aktivitäten und zum anderen aus der Netzwerkbegrenzung. Letztere tritt dann ein, wenn durch die Beschleunigung einer Aktivität eine neue kritische Aktivität entsteht. Eine tabellarische Erfassung dieser Netzwerkbegrenzung ist das Kernstück der nachfolgenden Überlegungen. Die jeweils dominierende Begrenzung (aus Zusammenbruchsdauer und Netzwerkbegrenzung) wird in die Spalte "Zeitkürzung" eingetragen und ergibt durch Multiplikation mit der Spalte Kosten/Zeiteinheit den Kostenanstieg für die direkten Projektkosten. Die beiden letzten Spalten enthalten die aus der Beschleunigung resultierenden gesamten direkten Projektkosten und die Projektdauer.

Arbeitsblatt II (Abb. 58): Die Aktivitäten sind nach ihren Beschleunigungskosten geordnet. In der Spalte "Kritischer Weg Zyklus" wird eingetragen, wann eine Aktivität kritisch wird, so daß beim späteren Rechengang sofort ersichtlich ist, ob eine Aktivität kritisch ist oder nicht. Eintragungen in der Spalte "Schlußzyklus" geben an, bei welchem Zyklus eine kritische Operation entweder bis zur Zusammenbruchsdauer beschleunigt wurde oder eine weitere Verkürzung der Aktivität bewirken würde, daß diese ihren kritischen Charakter verliert. Der rechte Teil der Tabelle gibt einen fortlaufenden Bericht über die verbleibenden Aktivitätsdauern und Beschleunigungsmöglichkeiten. Die Anfangswerte hierfür ergeben sich aus Abb. 56 (Grunddaten). Dieses zweite Arbeitsblatt ist ein "Merkzettel", der eine gute Übersicht über mögliche Kürzungen und Beschleunigungskosten gibt, was besonders bei komplexen Netzwerken notwendig ist.

Zyklus	Kritische Operationen mit dem geringsten Kostenanstieg				Beschleunigungsbegrenzungen					Zeitkürzung	Kosten / Zeiteinheit	Kostenanstieg	Gesamte direkte Projektkosten	Projektdauer
	1.	2.	3.	4.	1.	2.	3.	4.	Netzwerk begrenzung					
0													46 300	46
1	0 - 1				5				—	5	300	1 500	47 800	41
2	4 - 5				7				2	2	600	1 200	49 000	39
3	1 - 3	4 - 5			2	5			16	2	900	1 800	50 800	37
4	3 - 6	4 - 5			3	10			13	3	1100	3 300	54 100	34
5	3 - 6	1 - 4			7	5			10	5	1200	6 000	60 100	29
6	3 - 6	5 - 6			2	1			6	1	1500	1 500	61 600	28

ARBEITSBLATT I

Abb. 57

Aktivität	Kostenanstieg / Zeit	Kritischer Weg-Zyklus	Schluß-Zyklus	Normalzeit	Kürzungsmöglichkeit	Verbleibende Zeit- und Kürzungsmöglichkeit						
						Zyklus	2	3	4	5	6	7
0 - 1	300	○	1	10	5	5 ○						
1 - 3	300	2	3	6	2			4 ○				
3 - 5	300			3	2							
1 - 2	400			6	3							
2 - 6	500			4	3							
3 - 6	500	2		20	10				17 7	12 2	11 1	
4 - 5	600	○	4	14	7		12 5	10 3	7 ○			
1 - 4	700	○	5	10	5					5 ○		
4 - 7	700			22	7							
7 - 8	800			3	1							
5 - 6	1000	○	6	4	1						3 ○	
5 - 8	1000			10	5							
6 - 8	—	○		8	–							

Arbeitsblatt II

Abb. 58

Arbeitsblatt III (Abb. 59): Folgen aus Arbeitsblatt II die Beschleunigungsmöglichkeiten, die durch die Zusammenbruchsdauer der Aktivitäten bedingt sind, so kann mit Hilfe von Arbeitsblatt III in Zusammenhang mit Arbeitsblatt IV und V die Netzwerkbegrenzung bestimmt werden. Der Kopf von Arbeitsblatt III enthält: den Zyklus, die zu kürzende Operation (deren Bestimmung sich aus Arbeitsblatt II ergibt), die Netzwerkbegrenzung und die effektive Projektverkürzung im jeweiligen Zyklus. Unter dem Kopf folgen spaltenweise:

1. Alle Vorlaufsaktivitäten, denen eine (oder mehrere) andere Aktivität(en) im Netzwerk folgt, geordnet von 0 bis n - 1.

2. In der zweiten Spalte sind alle Folgeaktivitäten so eingetragen, daß sie den in der ersten Spalte zugehörigen Vorlaufaktivitäten zugeordnet sind. Die nächsten beiden Spalten enthalten das frühestmögliche Ende der Vorlaufaktivitäten und den frühestmöglichen Start der Folgeaktivitäten. Diese Werte werden aus der Zeitanalyse entnommen. Spalte 5 (lag) zeigt die Differenz von frühestmöglichem Ende der Vorlaufaktivität und frühestmöglichem Start der Folgeaktivität an. Die restlichen Spalten dienen der weiteren Berechnung der Netzwerkbegrenzung für die nachfolgenden Zyklen.

Arbeitsblatt IV (Abb. 6o und 61): Diese Matrix dient in Ergänzung zu Arbeitsblatt III der Bestimmung der Netzwerkbeschränkung. Zeitliche Verschiebungen im Netzwerk, die die Beschleunigung einer kritischen Aktivität hervorruft, kann man mit Hilfe dieser Matrix und Arbeitsblatt III bestimmen. Erforderliche Berichtigungen der Matrix, die nach den einzelnen Zyklen notwendig werden, sind dann aus Arbeitsblatt III zu entnehmen. Zur besseren Übersicht werden im folgenden einzelne Matrix-Operationen getrennt aufgezeigt.

Zyklus						1		2		3		4		5		6	
zu kürzende Aktivität						0-1		4-5		1-3 4-5		3-6 4-5		3-6 1-4		3-6 5-6	
Netzwerkbegrenzung						–		2		16		13		10		•	
Projektzeitverkürzung							5		2,		2		3		5		
Vor. Aktivit.	Folgeaktivit.	Vorl. F.E.	Folge F.S.	lag		lag		lag		lag		lag		lag		lag	
0-1	1-2	10	10	0	<	<											
	1-3	10	10	0	<	<											
	1-4	10	10	0	<	<											
1-2	2-6	16	16	0	<	<											
1-3	3-6	16	16	0	<	<				<	<						
	3-5	16	16	0	<	<				<	<						
1-4	4-5	20	20	0	<	<								<	<		
	4-7	20	20	0	<	<								<	<		
2-6	6-8	20	38	18	<	<		<	16	Ⓚ	14	<	11	<	6	Ⓚ	5
3-5	5-6	19	34	15	<	<		<	13	<	<	Ⓚ	10	Ⓚ	5		
	5-8	19	36	17	<	<		<	15	<	<	<	12	<	7		
3-6	6-8	36	38	2	<	<		Ⓚ	0	<	<	<	<	<	<	<	<
4-5	5-6	34	34	0	<	<		<	<	<	<	<	<	<	<		
	5-8	34	34	0	<	<		<	<	<	<	<	<	<	<		
4-7	7-8	42	42	0	<	<								<	<		
5-6	6-8	38	38	0	<	<		<	<	<	<	<	<	<	<	<	<

Arbeitsblatt III

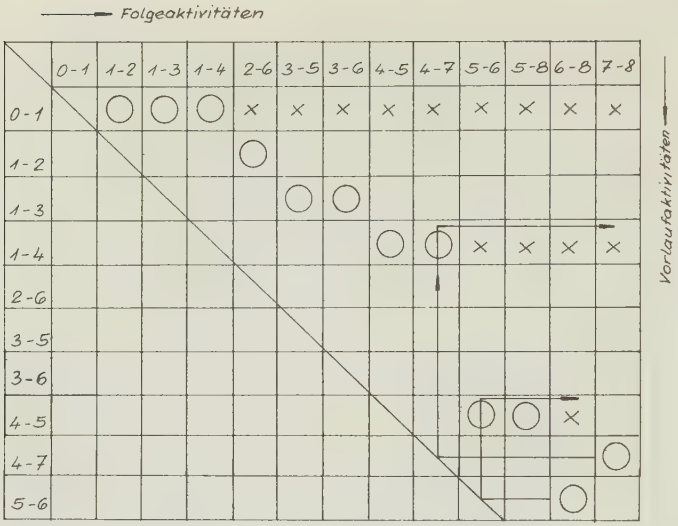


Abb. 60

Arbeitsblätter IV

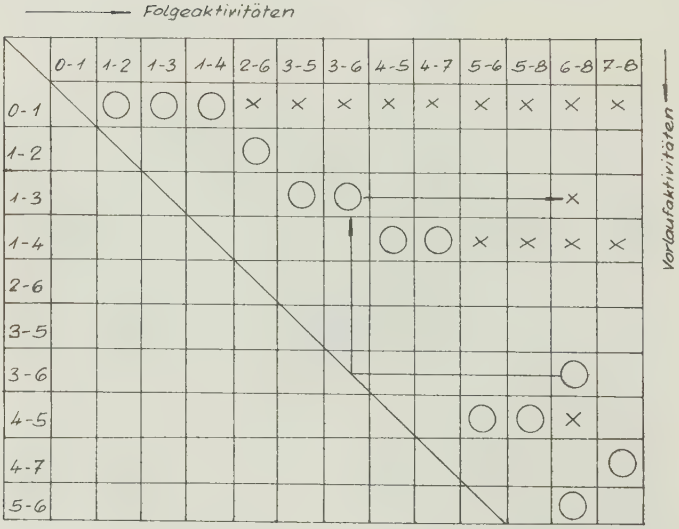


Abb 61

Arbeitsblatt V (Abb. 62 und 63): Ist eine Netzwerkdarstellung, aus der zu entnehmen ist, welche Wege im Netzwerk kritisch sind bzw. werden. Eine einfache Verbindungslinie zeigt an, welche Operationen zusammenhängen. Folgt aus Arbeitsblatt III ein "lag" von 0, so wird zwischen diesen Ereignissen eine Doppellinie eingetragen. Wenn hierdurch ein zusammenhängender Weg vom Beginn bis zum Terminus entsteht, ist ein neuer kritischer Weg gegeben, der durch eine dreifache Linie dargestellt wird. Entsteht ein neuer oder kritischer Weg oder entfällt einer, dann ist dies in Arbeitsblatt II zu vermerken.

Arbeitsblatt VI (Abb. 65): Ist eine Zusammenfassung von direkten-, indirekten- und Opportunitäts-Kosten für das gesamte Projekt. Sobald die Gesamtkosten ansteigen, ist das Optimum der gesamten Projektkosten erreicht und die Berechnung beendet.

Die Berechnung beginnt mit Zyklus 0 in Arbeitsblatt I. Zunächst sind die normalen direkten Projektkosten und die zugehörige Projektzeit einzutragen (46.3oo DM und 46 Wochen). Die erste Projektkürzung wird in Zyklus 1 durchgeführt, wobei die Frage zu beantworten ist, welche Beschleunigung einer kritischen Aktivität den geringsten Kostenanstieg/Zeit verursacht und welche Zeitverkürzung möglich ist. Hierbei ist zu beachten, daß die Beschleunigung erstens durch die Zusammenbruchsdauer und zweitens durch die Netzwerkbegrenzung eingeengt ist. Aus Arbeitsblatt II folgt, daß vor dem 1. Zyklus nur die Aktivitäten (0,1), (4,5), (1,4), (5,6) und (6,8) kritisch sind. Die günstigste Verkürzung ist über die Aktivität (0,1) (3oo DM/Woche) möglich, wobei sich aus Arbeitsblatt II eine Beschleunigung um 5 Wochen anbietet. Zuvor ist jedoch zu untersuchen, wie groß die Netzwerkbeschränkung ist. Hierzu werden die "lag-Werte" mit der Ziffer 0, die sich in Arbeitsblatt III (Abb. 59) aus der Differenz von frühestmöglichem Ende der Vorlaufaktivität und frühestmöglichem Start der Folgeaktivität ergaben, in Arbeitsblatt IV (Abb. 6o) vermerkt. In dieser Matrix trägt man in der ersten Spalte die Vorlaufaktivitäten und in der ersten Zeile die Folgeaktivitäten ein. In den Feldern oberhalb der Diagonalen sind die jeweiligen Netzwerkbeziehungen der einzelnen Aktivitäten eingetragen. Zunächst werden die "lag-Werte" mit der Ziffer 0 in den entsprechenden Feldern der Matrix gekennzeichnet. Die 0-Symbole in der Matrix zeigen hierbei nur direkte Beziehungen

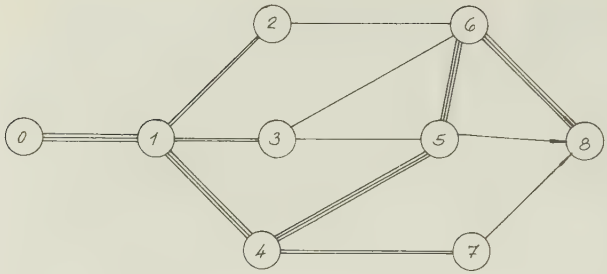


Abb. 62

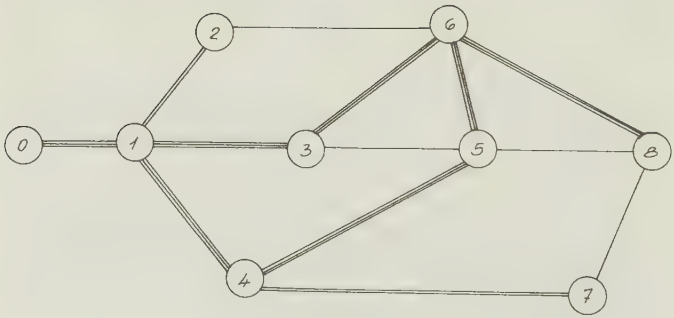


Abb. 63

Arbeitsblätter V

Anmerkung:

Zu beachten ist, daß hierbei ein ereignisorientiertes Denken erforderlich wird. Wenn z.B. zwischen der Vorlaufaktivität (0-1) und den Folgeaktivitäten (1-2), (1-3) und (1-4) ein 0-lag besteht, so wird die Doppellinie nur zwischen dem Anfangsereignis der Vorlaufaktivität und dem Anfangsereignis der Folgeaktivität gezogen, also zwischen Ereignis (0) und (1) und nicht noch zwischen (1) - (2), (1) - (3) und (1) - (4).

zwischen den einzelnen Aktivitäten an, d.h. solche, die zwischen Vorlauf- und Folgeaktivität bestehen. Durch X-Symbole werden diese Beziehungen ergänzt, wobei durch die X-Symbole solche Netzwerkbeziehungen aufgezeigt werden, die zwischen einer zeitlich zusammenhängenden Folge von Aktivitäten bestehen. Anfangsaktivität dieser zusammenhängenden Kette ist diejenige, in deren Zeile sich die Eintragungen befinden. Graphisch kann man diesen Zusammenhang durch ein Balkendiagramm darstellen. (Abb.64) Wird z.B. die Aktivität (4,5) um einen Tag gekürzt, so verschieben sich die Balken, die die Operationen (5,6), (5,8) und (6,8) wiedergeben, um einen Tag nach links.

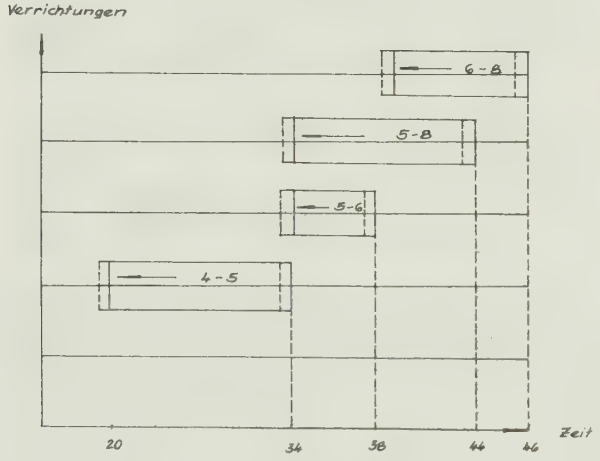


Abb. 64

Auch hier hilft ein einfacher Algorithmus festzustellen, welche Aktivitäten durch zeitliche Veränderung einer kritischen Aktivität betroffen werden können. X-Symbole werden wie folgt zur Kennzeichnung dieser Beziehungen eingetragen:

1. Beginne in der letzten Zeile, die ein 0-Symbol enthält und gehe in dieser Zeile bis zu dem Schnittpunkt dieser Zeile mit der Diagonalen.

2. Gehe in der Spalte, die durch den Schnittpunkt der ersten Zeile mit der Diagonalen bestimmt ist, aufwärts, bis ein 0-Symbol erreicht ist.

3. In dieser Zeile des 0-Symbols (aus Schritt 2) zeichne über dem 0-Symbol (bzw. den 0-Symbolen) der Ausgangszeile ein X ein.

4. Wiederhole diesen Vorgang zeilenaufwärts bis zur letzten Zeile, wobei zu beachten ist, daß in den nachfolgenden Schritten nicht nur über dem 0-Symbol (bzw. 0-Symbolen) der Ausgangszeile ein X eingetragen wird, sondern auch über allen X-Symbolen der Ausgangszeile.
   Für obiges Beispiel folgt:

   1. Anfangspunkt, letztes 0-Symbol → Vorlaufaktivitätszeile (5-6).

   2. Schnittpunkt mit der Diagonalen ergibt die Spalte (5-6).

   3. X-Symbol wird in der gleichen Spalte (6-8) wie das 0-Symbol der Ausgangszeile eingetragen usw.

Der Abschluß obiger Operationen zeigt dann, daß bei allen Folgeaktivitäten von (0-1) 0-Symbole oder X-Symbole eingetragen sind. Dies besagt, daß diese nachfolgenden Aktivitäten durch eine Zeitänderung der Vorlaufaktivität (0-1) in ihrem zeitlichen Verlauf verändert werden können. Ob dies vorliegt, erkennt man aus den nachfolgenden Überlegungen anhand von Arbeitsblatt III. Hierzu wird in der linken Hälfte der Spalte unter Zyklus 1 vermerkt, welche Vorlaufaktivitäten ihren frühestmöglichen Endzeitpunkt aufgrund der Beschleunigung der Aktivität (0-1) auf einen früheren Zeitpunkt vorverlegt haben. Es gibt hierbei zwei Grundlagen für diese Eintragungen. Zunächst ist der frühestmögliche Abschluß der beschleunigten Aktivität (0-1) zu vermerken und zum anderen ist diese Eintragung bei allen Aktivitäten zu machen, die in der Zeile der beschleunigten Vorlaufaktivität ein X- oder ein 0-Symbol haben.

Um anzuzeigen welche Folgeaktivitäten ihren frühestmöglichen Startzeitpunkt durch die Beschleunigung der Aktivität (0-1) vorverlegt haben, wird in dem rechten Teil der Spalte unter dem Zyklus 1 das gleiche Zeichen

benutzt. Die gleichen 0- und X-Symbole aus der Matrix bestimmen auch hier wieder die betroffenen Aktivitäten (für 0-1 als Vorlaufaktivität trifft dies im obigen Beispiel für alle übrigen Aktivitäten zu). Zu beachten ist, daß diese Eintragungen nur neben den entsprechenden Folgeaktivitäten der Spalte II zu machen sind.

Die horizontalen V-Symbole in der Spalte unter Zyklus 1 zeigen an, daß frühestmögliche Start- und Endzeiten der gekennzeichneten Aktivitäten vorverlegt sind. Hierbei sind folgende Variationsmöglichkeiten gegeben:

1. Ist weder in der rechten noch in der linken Hälfte der Zyklus - 1 - Spalte ein $<$ Symbol eingetragen, so bedeutet dies, daß weder das frühestmögliche Ende der Vorlaufaktivität noch der frühestmögliche Start der Folgeaktivität verändert wurde. Der lag-Wert bleibt somit unverändert.

2. Ein $<$ Symbol sowohl in dem rechten als auch in dem linken Teil der Zyklus - 1 - Spalte bedeutet hingegen, daß sowohl die Vorlaufaktivität als auch die Folgeaktivität vorverlegt werden. Der lag-Wert bleibt auch hierbei unverändert, was aus dem Balkendiagramm (Abb. 64) deutlich wird.

3. Ein $<$ Symbol im linken Teil der Zyklus - 1 - Spalte bedeutet, daß bei dieser Beschleunigungsoperation die betroffene Vorlaufaktivität ihr frühestmögliches Ende vorverlegt hat. Der lag-Wert vergrößert sich hierdurch.

4. Ein $<$ Symbol im rechten Teil der Zyklus - 1 - Spalte bedeutet, daß der frühestmögliche Start der betroffenen Folgeaktivität durch die Kürzung der kritischen Aktivität (0-1) auf einen früheren Zeitpunkt vorgeschoben wird. Dies bewirkt eine Reduzierung des lag-Wertes gegen 0.

Von allen diesen betroffenen Folgeaktivitäten wird die mit dem kleinsten lag-Wert (in Spalte 5) ausgewählt. Dieser lag-Wert ist dann die gesuchte Netzwerkbeschränkung. Ist diese Netzwerkbeschränkung $<$ die Beschränkung, die aus der Zusammenbruchsdauer folgt, so ist sie die dominierende Beschränkung und bestimmt somit die Projektverkürzung im jeweiligen Zyklus. Hierdurch wird die ausgewählte Aktivität mit dem kleinsten lag-Wert kritisch, was in der Matrix

und in Arbeitsblatt II einzutragen ist. Ob sich durch diesen lag-Wert ein neuer kritischer Weg ergibt, kann erst im Zusammenhang mit Arbeitsblatt V entschieden werden. Entsteht durch die neue kritische Aktivität eine kontinuierliche Folge von kritischen Aktivitäten, die vom Start bis zum Terminus führt, so ist ein neuer kritischer Weg gegeben. Hierbei ist es auch möglich, daß sich der neue kritische Weg teilweise mit dem "main-chain" deckt.

Für obiges Beispiel ist durch die Verkürzung der Aktivität (0-1) für jede Aktivität sowohl das frühestmögliche Ende als auch der frühestmögliche Start vorverlegt worden. Der lag-Wert bleibt dadurch für alle Aktivitäten erhalten und es liegt für die Beschleunigung der kritischen Aktivität (0-1) keine Netzwerkbeschränkung vor. Die mögliche Verkürzung ergibt sich daher aus der Beschleunigung bis zur Zusammenbruchsdauer, die für die Aktivität (0-1) 5 Wochen beträgt. Im ersten Zyklus wird somit die Projektzeit um 5 Wochen verkürzt. Diese Begrenzungen aus Zusammenbruchsdauer und Netzwerkbeschränkung werden in Arbeitsblatt I eingetragen. Bei einer Verkürzung von 5 Wochen entstehen Beschleunigungskosten von 1.5oo DM, so daß die gesamten direkten Projektkosten nach dem ersten Zyklus 47.8oo DM bei einer Projektdauer von 41 Wochen betragen. Die Netzwerksituation nach dem ersten Zyklus ist aus Arbeitsblatt V (Abb. 62) zu entnehmen, wobei dargestellt wird:

Verbindungslinie mit positivem "lag" ———

Verbindungslinie mit 0 - "lag" ═══

Kritischer Weg ═══

Nach Arbeitsblatt VI, daß eine Zusammenfassung der direkten-, indirekten- und Opportunitätskosten ist, entstehen für die gesamten Projektskosten nach der ersten Projektverkürzung 68.1oo DM (Abb.65).[1)]

1) Die Zahlenwerte entsprechen denen des letzten Beispiels aus Abschnitt 251, wobei 4oo DM an Opportunitäts- und indirekten Kosten/Woche entfallen.

Projektdauer (Wochen)	direkte Gesamtkosten	indirekte Kosten	Opportunitäts-kosten	Gesamte Projektkosten
28	61 600	15 100	-	76 700
29	60 100	15 200	300	75 600
34	54 100	15 700	1800	71 600
37	50 800	16 000	2700	69 500
39	49 000	16 200	3300	68 500
41	47 800	16 400	3900	68 100
46	46 300	16 900	5400	68 600

Arbeitsblatt VI

Abb. 65

Bevor mit dem zweiten Kürzungszyklus begonnen wird, sind die Arbeitsblätter auf den neuesten Stand zu bringen. In Arbeitsblatt II ist die Kürzung der Aktivität (0-1) bis zum "crash-point" zu vermerken. Dann ist die effektive erste Projektkürzung in Arbeitsblatt III einzutragen, sowie die Reduzierung der einzelnen lag-Größen (bei Beschleunigung der Aktivität (0-1) ergab sich keine Reduzierung von lag-Werten, so daß sich die Berichtigung in diesem Fall erübrigt). Folgt aus dem vorangegangenen Zyklus, daß eine positive lag-Größe zu einem 0-lag wird, oder ein 0-lag zu einem positiven lag, so muß eine entsprechende Berichtigung in der Matrix erfolgen. Dieses alles entfällt nach der Beschleunigung der Aktivität (0-1), und es kann unmittelbar mit Zyklus 2 begonnen werden. Für eine weitere Beschleunigung bietet sich (4-5) mit einem Kostenanstieg von 600 DM/Woche an, wobei eine Reduzierung von 5 Wochen bis zum Zusammenbruchspunkt möglich ist (s. Arbeitsblatt II). Dies wird in Arbeitsblatt I vermerkt. Zur Bestimmung der Netzwerkbeschränkung ergeben sich aus Arbeitsblatt IV - nach den oben erläuterten Regeln - die entsprechenden Eintragungen unter Zyklus 2 in Arbeitsblatt III.[1)]

1) Anmerkung: Die Aktivitäten (5-8), (6-8) und (7-8) entfallen als Vorlaufaktivitäten, da es für diese keine Folgeaktivitäten gibt.

Hierbei bestimmt die Aktivität (3-6) die Netzwerkbeschränkung von 2 Wochen. Dieser Wert dominiert gegenüber der möglichen Beschleunigungsbegrenzung aus der Zusammenbruchsdauer, so daß im zweiten Zyklus eine Projektverkürzung um 2 Wochen erfolgt. Aus Arbeitsblatt II folgt ein Kostenanstieg um 1.2oo DM auf 49.ooo DM bei einer Projektverkürzung auf 39 Tage. Arbeitsblatt VI zeigt an, daß bei 49.ooo DM direkten, 16.2oo DM indirekten und 3.3oo DM an Opportunitäts-Kosten bereits ein Anstieg der Gesamtkosten auf 68.5oo DM zu verzeichnen ist. Das Gesamtkostenoptimum liegt somit bei 41 Wochen und 68.1oo DM.

Obwohl hiermit die Berechnung beendet ist, sollen doch noch weitere Verkürzungen zur Erläuterung durchgeführt werden. Zunächst sind die Arbeitsblätter auf den neuesten Stand zu bringen. In Arbeitsblatt III wird die Projektverkürzung aus Zyklus 2 eingetragen sowie die reduzierten lag-Werte vermerkt. Für (3-6) ergibt sich ein 0-lag, so daß diese Aktivität kritisch wird. Aus Arbeitsblatt V (Abb. 62) wird deutlich, daß hierdurch ein neuer kritischer Weg entstanden ist, der über die Aktivitäten (0-1), (1-3), (3-6) und (6-8) führt, so daß das in Abb. 63 wiedergegebene Netzwerk nach Zyklus 2 vorliegt. In Arbeitsblatt II ist in der Spalte "kritischer Weg Zyklus" zu vermerken, daß die Aktivitäten (1-3) und (3-6) im zweiten Zyklus kritisch geworden sind. Weiterhin ist die Reduktion der Aktivität (4-5) aus Zyklus 2 einzutragen. Da im Zyklus 3 zwei kritische Wege vorliegen, ist zu überprüfen, ob es kostengünstiger ist:

1. Eine kritische Aktivität zu kürzen, die zu beiden kritischen Wegen gehört (z.B. (0-1) oder (6-8)).

2. Für jeden kritischen Weg getrennt eine kritische Aktivität zu beschleunigen, die jeweils nur in einer kritischen Aktivitätsfolge enthalten ist (z.B. (1-3) und (4-5)).

Da im obigen Beispiel eine Reduzierung der gemeinsamen kritischen Aktivitäten (6-8) und (0-1) nicht (bzw. nicht mehr) möglich ist, sind die Aktivitäten (1-3) mit 3oo DM/Woche und (4-5) mit 6oo DM/Woche zu beschleunigen. Für (1-3) besteht hierbei eine Begrenzung von 2 Wochen bis zum Zusammenbruchs-

punkt. Die berichtigte Matrix zur Bestimmung der Netzwerkbeschränkung ist in Abb.61 wiedergegeben. Sie enthält in Ergänzung zu Abb.6o im Schnittpunkt der Vorlaufaktivitätszeile (3-6) und der Folgeaktivitätszeile (6-8) ein 0-Symbol, das durch die Reduzierung auf ein 0-lag aus Zyklus 2 entstanden ist, sowie ein daraus folgendes X-Symbol. Aus der Matrix und Arbeitsblatt III folgt, daß die Netzwerkbeschränkung im dritten Zyklus 16 beträgt und somit die Beschränkung aus der Zusammenbruchsdauer dominierend ist. Die Projektverkürzung im dritten Zyklus ist somit 2 Wochen, mit einem Kostenanstieg von 1.8oo DM auf 5o.8oo DM bei 37 Wochen Projektdauer (s. Arbeitsblatt I). An Gesamtkosten ergeben sich dann bei 37 Wochen 69.5co DM (s. Arbeitsblatt VI, Abb.65).

Sind die entsprechenden Ergänzungen in den einzelnen Arbeitsblättern erfolgt, so kann Zyklus 4 unter Beachtung der aufgezeigten Schritte durchgeführt werden.

Aus Arbeitsblatt II ist zu ersehen, daß die günstigste Beschleunigung über die Aktivitäten (3-6) - mit 5oo DM/Woche - und (4-5) mit 6oo DM/Woche erfolgt. Die Aktivität (4-5) kann hierbei höchstens um 3 Wochen beschleunigt werden. Arbeitsblatt III (Abb.59) und IV (Abb. 61) zeigt eine Netzwerkbeschränkung von 13 Wochen, so daß die Beschränkung von 3 Wochen dominierend ist. Aus Arbeitsblatt I folgt bei einer Verkürzung um 3 Wochen ein Kostenanstieg von 3.3oo DM auf 54.1oo DM bei einer Gesamtprojektdauer von 34 Wochen. Eine Gegenüberstellung der direkten, indirekten und Opportunitäts-Kosten in Arbeitsblatt VI zeigt einen weiteren Anstieg der gesamten Projektkosten auf 71.6oo DM an. Nach erneuter Ergänzung der Arbeitsblätter kann Zyklus 5 beginnen. Beschleunigt werden die Aktivitäten (3-6) und (1-4), wobei die Beschränkung aus der Zusammenbruchsdauer 5 Wochen und die Netzwerkbeschränkung 1o Wochen beträgt, so daß im Zyklus 5 eine Verkürzung um 5 Wochen mit einem Kostenanstieg von 6.ooo DM auf 6o.1oo DM direkte Projektkosten bei 29 Wochen Dauer erfolgt. Die Gesamtkosten steigen weiter auf 75.6oo DM.

Für Zyklus 6 erfolgt eine Reduzierung der Aktivitäten (3-6) und (5-6), wobei letztere um eine Woche bis zum "crash-point" verkürzt werden kann. Da die Netzwerkbeschränkung 6 Wochen beträgt, wird das Projekt in Zyklus 6 um 1 Woche auf 28 Wochen mit 1.5oo DM

Kostenanstieg beschleunigt, so daß gesamte Projektkosten in Höhe von 76.7oo DM entstehen.

Eine weitere Kürzung der Projektdauer ist nicht möglich, da der erste kritische Weg (main-chain) nicht weiter beschleunigt werden kann. (Alle Aktivitäten sind am Zusammenbruchspunkt angelangt).

Obwohl das aufgezeigte Verfahren zur optimalen Projektverkürzung zunächst umständlich erscheint, so zeigt sich, daß nach kurzer Einarbeitungszeit und vorliegenden Arbeitsblättern eine schnelle Berechnung des Optimums möglich ist. Da die Methode darüber hinaus rein schematisch ist, kann sie auch von Hilfskräften durchgeführt werden.

26 Optimale Zuordnung des Produktionspotentials

261 Einführung und Problemstellung

Die Realisierung der minimalen Projektdauer unterlag bislang nur einer Beschränkung: den Kosten.
Unter Beachtung dieser Beschränkung wurde in der dritten Netzwerkplanungsphase die "kostenoptimale Projektzeit" berechnet. Dieses Optimum aus Projektzeit und -kosten ist jedoch noch keine Lösung des "Ablaufplanungsdilemmas". Hierzu ist weiterhin eine optimale Zuordnung des Produktionspotentials erforderlich, so daß Belastungsschwankungen weitgehend ausgeglichen werden. Diese können trotz realistischer Annahme bei der Zeitanalyse nicht von vornherein ausgeschaltet werden, da hierbei nicht zu übersehen ist, welche Gesamtbeanspruchung sich für die Produktionsfaktoren im Zeitablauf aus den einzelnen Zeitschätzungen ergibt. Neben dem anzustrebenden Belastungsausgleich sind Kapazitätsbeschränkungen zu berücksichtigen, die die Verwirklichung der "kostenoptimalen Projektdauer" beeinträchtigen können.

Bei der Potentialzuordnung bleibt zunächst unberücksichtigt, daß mehrere Projekte zurgleichen Zeit durch-

zuführen sind, so daß eine gegenseitige Planungsabhängigkeit gegeben ist.[1)]

Die Beschränkung des Potentials aus laufenden Baustellen wird bei der Planung eines neuen Bauprojektes als Datum angesetzt. Diese theoretische Vereinfachung ist für den Baubetrieb eine praktikable Näherungslösung, da:

1. In einem Baubetrieb das Nacheinander gegenüber dem Nebeneinander der Projekte dominiert.

2. Der Baustelle über längere Zeiträume hinweg ein bestimmtes Produktionspotential von Arbeitskräften und Maschinen zugeordnet ist, das entsprechend dem Bauablauf eingesetzt wird.[2)] Eine ständige Neuzuordnung entfällt wegen der damit verbundenen hohen Kosten.

Ziel einer optimalen Baustellenzuordnung des Produktionspotentials muß es sein, folgende Forderungen anzustreben:

1. Bereitstellung des für die Termineinhaltung erforderlichen Produktionspotentials unter Berücksichtigung von Kapazitätsbeschränkungen.

2. Gleichmäßige Gesamtbeschäftigung auf der Baustelle.

3. Gleichmäßige Auslastung bei den einzelnen Kapazitätsgruppen.

4. Harmonisierung der einzelnen Kapazitätsgruppen aufeinander.

---

1) Auf die Vorteile der simultanen Mehrprojektplanung gegenüber der sukzessiven Einprojektplanung wird im nächsten Abschnitt eingegangen.

2) Vergl. Wagner, G.: a.a.O., S. 46 ff.

262 Lösungsansätze

2621 Manpower Smoothing [1]

Manpower Smoothing strebt durch zeitliches Verschieben der Schlupfaktivitäten einen Belastungsausgleich an. Die hierfür zur Verfügung stehenden Computerprogramme können bis zu 1o unterschiedliche Kapazitätskategorien, wie z.B. verschiedene Arbeitsarten oder Maschinengruppen, speichern. Ein Belastungsausgleich durch Verschieben der Schlupfaktivitäten ist nur innerhalb der Zeitpuffer möglich, wenn der vorgegebene Endtermin eingehalten werden soll.[2]

"Manpower Smoothing" kann auch manuell ohne die Verwendung einer Datenverarbeitungsanlage durchgeführt werden. Grundlage für den anzustrebenden Belastungsausgleich ist die Kenntnis der Potentialbeanspruchung durch die einzelnen Aktivitäten. Welche und wieviel Produktionsfaktoren erforderlich sind, um die Aktivität $Y_{i,j}$ in einer bestimmten Zeit ausführen zu können, ist bereits bei der Zeitanalyse zu entscheiden gewesen. Um die Gesamtbeanspruchung der einzelnen Produktionsfaktoren im Zeitablauf zu bestimmen, trägt man die einzelnen Aktivitäten in einem Balkendiagramm ein. Zunächst sind die Aktivitäten des kritischen Weges zu kennzeichnen. Danach folgen die restlichen Aktivitäten, die primär nach aufsteigenden frühestmöglichen Startzeitpunkten und sekundär nach aufsteigenden totalen Pufferzeiten einzuordnen sind (Abb. 67). Die für die Durchführung der einzelnen Aktivitäten erforderlichen Produktionsfaktoren werden im Balkendiagramm durch Kennziffern wiedergegeben, wobei die Stellung einer Zahl in einer Zahlenfolge den jeweiligen Produktionsfaktor kennzeichnet. Den Erfordernissen entsprechend kann man den Kennziffern unterschiedliche Berufe, Arbeitsgruppen, Geräte, Maschinen usw. zuordnen. So bedeutet, z. B. die Zahlenfolge 4 - 11 - 3, daß 4 Hilfsarbeiter, 11 Maurer und 3 Zimmerleute zur Durchführung der Aktivität erforderlich sind. Für einen Baubetrieb dürfte es

---

1) Manpower Smoothing ist eine Variante des LESS-Systems und bedeutet etwa: Ausgleich der Belastungspläne.

2) Vergl. Burgess, A.R.: Killebrew, J.B.: Variation in activity level on a cyclical arrow diagram, Journal of Industrial Engineering 13 (1962), S. 77 ff.

zweckmäßig sein, den Belastungsausgleich der Arbeitskräfte und Maschinen in zwei getrennten Balkendiagrammen durchzuführen.[1] Oft wird sich auch ein Belastungsausgleich für die Baumaschinen erübrigen, da hierbei vielfach die Bereitstellung- und nicht die Ablaufplanung im Vordergrund steht. So ist z.B. bei einem Hochbau zu entscheiden, ob, wie lange und welcher Kran für diese Arbeiten erforderlich ist. Die Auslastung folgt dann aus dem Bauablauf. Diese Vereinfachung gilt jedoch nicht für Baumaschinen, die ihren Einsatzort kurzfristig wechseln wie z.B. bei Betonfahrzeugen oder bei Baggern für den Bodenaushub bei Hochbauten. Inwieweit "Manpower Smoothing" den obigen Anforderungen einer optimalen Zuordnung des Produktionspotentials im Baubetrieb entspricht, soll nachfolgendes einfaches Netzwerkbeispiel zeigen (Abb. 66).

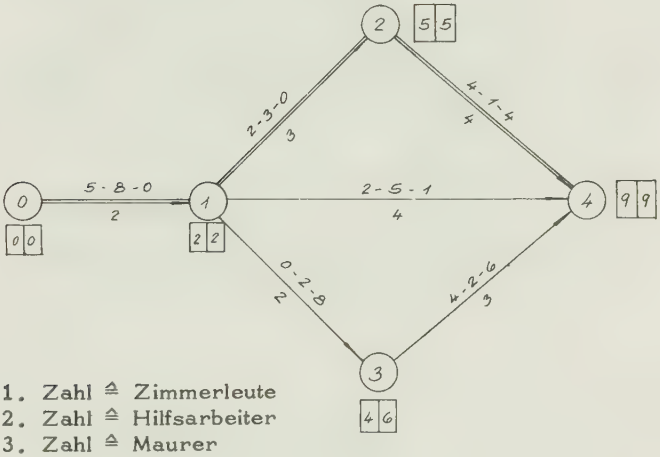


Abb. 66

1) Vergl. Jurecka: Netzwerkplanung im Baubetrieb, Aachen 1965, S. 34

Der Zahlenwert unter dem Aktivitätspfeil gibt die für die Durchführung erforderliche Zeit an und die Zahlenfolge auf dem Aktivitätspfeil zeigt, welche und wieviel Produktionsfaktoren hierfür erforderlich sind.

Dieser Projektablauf kann unter Beachtung obiger Grundsätze auch durch ein Balkendiagramm wiedergegeben werden. Beginnen hierbei alle Aktivitäten zum frühestmöglichen Startzeitpunkt, so bedingt dieses die in Abb. 67 dargestellte Produktionsfaktorenbeanspruchungen.

Beginnt man hingegen alle Aktivitäten zum spätestmöglichen Termin, so ergibt sich eine Potentialbeanspruchung entsprechend Abb. 68.

Ein teilweiser Ausgleich der Schwankungen kann durch Verschieben der nichtkritischen Aktivitäten innerhalb ihrer Pufferzeiten erfolgen (Abb. 69).[1)]

Während bei frühestmöglichem (spätestmöglichem) Beginn aller Aktivitäten die Zahl der erforderlichen Arbeitskräfte zwischen 9 - 29 (5 - 29) schwankt, kann nach Abb. 69 eine Nivellierung der Belastungskurve auf 13 - 23 erreicht werden. Durch Unterbrechung einzelner Arbeitsgänge oder Hinausschieben des Endtermines kann ein weiterer Ausgleich der Gesamtbelastungskurve erfolgen.

Die Lösung ist jedoch unbefriedigend, da:

1. Kapazitätsbeschränkungen unberücksichtigt bleiben.
2. Eine gleichmäßige Auslastung innerhalb der einzelnen Kapazitätsgruppen nicht gegeben ist.

---

1) Vergl. Waldron, J.A.: Fundamentals, a.a.O., S. 73 ff.

Aktivität	Dauer	Schlupf	Faktorbeanspruchung	1	2	3	4 Tage	5	6	7	8	9
0 - 1	2	0	5 - 8 - 0	580	580							
1 - 2	3	0	2 - 3 - 0			230	230	230				
2 - 4	4	0	4 - 1 - 4						414	414	414	414
1 - 3	2	2	0 - 2 - 8			028	028					
1 - 4	4	3	2 - 5 - 1			251	251	251	251			
3 - 4	3	2	4 - 2 - 6					426	426	426		
Belastungsbeanspruchung bei frühestmöglichem Start				580	580	4109	4109	8107	10811	8310	414	414
				13	13	23	23	25	29	21	9	9

Abb 67

Aktivität	Dauer	Schlupf	Faktorbeanspruchung	1	2	3	4 Tage	5	6	7	8	9
0 - 1	2	0	5 - 8 - 0	580	580							
1 - 2	3	0	2 — 3 — 0			230	230	230				
2 - 4	4	0	4 — 1 — 4						414	414	414	414
1 - 3	2	2	0 — 2 — 8					028	028			
1 - 4	4	3	2 — 5 — 1						251	251	251	251
3 - 4	3	2	4 — 2 — 6							426	426	426
Belastungsbeanspruchung bei				580	580	230	230	258	6813	10811	10811	10811
spätestmöglichem Start				13	13	5	5	15	27	29	29	29

Abb. 68

Aktivität	Dauer	Schlupf	Faktorbeanspruchung	1	2	3	4. Tage	5	6	7	8	9
0 - 1	2	0	5 - 8 - 0	580	580							
1 - 2	3	0	2 - 3 - 0			230	230	230				
2 - 4	4	0	4 - 1 - 4						414	414	414	414
1 - 3	2	2	0 - 2 - 8			028	028					
1 - 4	4	3	2 - 5 - 1			251	251	251	251			
3 - 4	3	2	4 - 2 - 6							426	426	426
Möglicher Belastungsausgleich				580	580	4 109	4 109	481	665	8 310	8310	8310
				13	13	23	23	13	17	21	21	21

Abb 69

2622 Manpower Scheduling[1)]

"Manpower Scheduling" unterscheidet sich vom obigen "Manpower Smoothing" dadurch, daß Kapazitätsbeschränkungen Berücksichtigung finden. Die begrenzt vorhandenen "Faktoren", wie z.B. Arbeitskräfte oder Maschinen, werden den Aktivitäten primär nach frühestmöglichen Startzeitpunkten und sekundär nach aufsteigendem Gesamtschlupf zugeteilt. Kritische Aktivitäten werden bevorzugt mit den erforderlichen "Ressourcen" versorgt. Sind die für den Start einer Aktivität notwendigen Produktionsfaktoren nicht verfügbar, so kommt diese Aktivität auf die Warteliste, wobei die Priorität durch obige Sortierfolge festgelegt ist. Bei der Zuordnung der knappen Faktoren ist es vielfach notwendig, mehrere Schritte im Maschinenrechenprogramm zurückzugehen, bevor eine neue Entscheidung möglich wird.[2)] Können die ursprünglich nicht kritischen Aktivitäten nicht im Rahmen ihrer Schlupfzeiten starten, so sind Terminverzögerungen c.p. unvermeidbar.

Potentialbegrenzungen können auch bei der Darstellungsform mit Balkendiagrammen berücksichtigt werden. Wird z.B. angenommen, daß für obiges Beispiel eine Beschränkung von 9 Maurern vorliegt, so ergibt sich entsprechend Abb. 70 eine Terminverlängerung um 3 auf 12 Tage.

Theoretisch ist auch "Manpower Scheduling" unbefriedigend, da zwar ein Gesamtbelastungsausgleich unter Berücksichtigung der Faktorbeschränkungen, nicht jedoch die Forderung nach Ausgleich innerhalb der einzelnen Faktorgruppen erfüllt wird.

---

1) Manpower Scheduling ist auch eine LESS-Variante und bedeutet: Aufteilung von begrenzten Arbeitsmitteln. s. hierzu Kattwinkel, W. und Wild, H.J.: Netzwerktechnik - Praktische Erfahrungen, Neue Betriebswirtschaft, Nr. 6 (1963), S. 212 und Nr. 17 (1964), S. 9 ff.
Bermann, H.: The Critical Path Method for Project Planning and Control, The Constructor Sept. 1961, S. 29 ff.

2) Vergl. v. Falkenhausen, H.: a.a.O., S. 272
Über Vorteile der manuellen Berechnung gegenüber dem Computer-Programm, s. Thumb, N.: a.a.O., S. 189

Aktivität	Dauer	Schlupf	Faktorbeanspruch.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
									Tage						
0 - 1	2	0	5 – 8 – 0	580	580										
1 - 2	3	0	2 – 3 – 0			230	230	230							
2 - 4	4	0	4 – 1 – 4						414	414	414	414			
1 - 3	2	2	0 – 2 – 8			028	028								
1 - 4	4	3	2 – 5 – 1					251	251	251	251				
3 - 4	3	2	4 – 2 – 6										426	426	426
				580	580	258	258	481	665	665	665	414	426	426	426
				13	13	15	15	13	17	17	17	9	12	12	12

Abb 70

In der Baupraxis ist dieser Ausgleich innerhalb einzelner Faktorgruppen i.d.R. gleichfalls gegeben und ein planmäßiges Warten von Arbeitskräften auf den Beginn einer Aktivität ist selten, da:

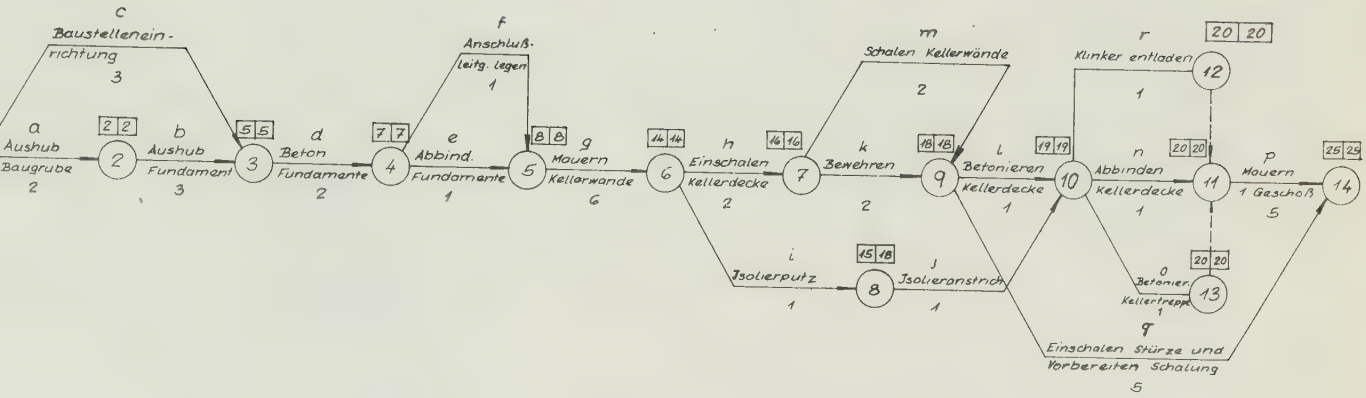
1. Einige Aktivitäten nicht aufgrund technologischer Beziehungen eindeutig festliegen, sondern vielmehr entsprechend dem Arbeitsanfall bei der Netzwerkkonstruktion eingeplant werden können, wie z.B. die Aktivitäten: Anschlußleitung legen, Isolierputz, Isolieranstrich, Schalen Kellertreppe und Klinker entladen in Abb. 71.
2. Die Facharbeiter auch Hilfsarbeiten und andersartige Tätigkeiten ausführen können, wie z.B. die Maurer die Tätigkeiten Aushub Fundamente, Anschlußleitung legen und Bewehren in Abb. 71.

Ein optimaler Ausgleich in der Potentialbeanspruchung einer Baustelle hängt besonders davon ab, inwieweit es gelungen ist:

1. Eine dem Bauobjekt entsprechende Faktorkombination zusammenzustellen. So muß z.B. der prozentuale Anteil der Zimmerleute gegenüber den Maurern und Hilfsarbeitern bei einem Stahlbetonbau größer sein, als bei einem Mauerwerksbau.
2. Beim Aufstellen des Netzwerkes technologisch unabhängige Aktivitäten so einzuordnen, wie dies für einen Belastungsausgleich sinnvoll ist.
3. Bei den nicht kritischen Aktivitäten durch entsprechenden Faktorentzug große Schlupfwerte zu beseitigen. So zeigt sich z.B. im Abb. 71, daß durch den Schlupf der Aktivität "Einschalen Stürze und Vorbereiten Schalung" von 2 Tagen ein entsprechender Leerlauf für die Zimmerleute entsteht.

Sind diese Gesichtspunkte bereits beim Aufstellen des Netzwerkes berücksichtigt, so werden große Schwankungen in der Potentialbeanspruchung bereits von Anfang an vermieden.

Für einen weiteren Ausgleich und die Überprüfung der Potentialbeschränkungen kann "Manpower Scheduling" Verwendung finden.



Neubau eines Einfamilienhauses

Abb. 71

2623 Methode des Leitweges

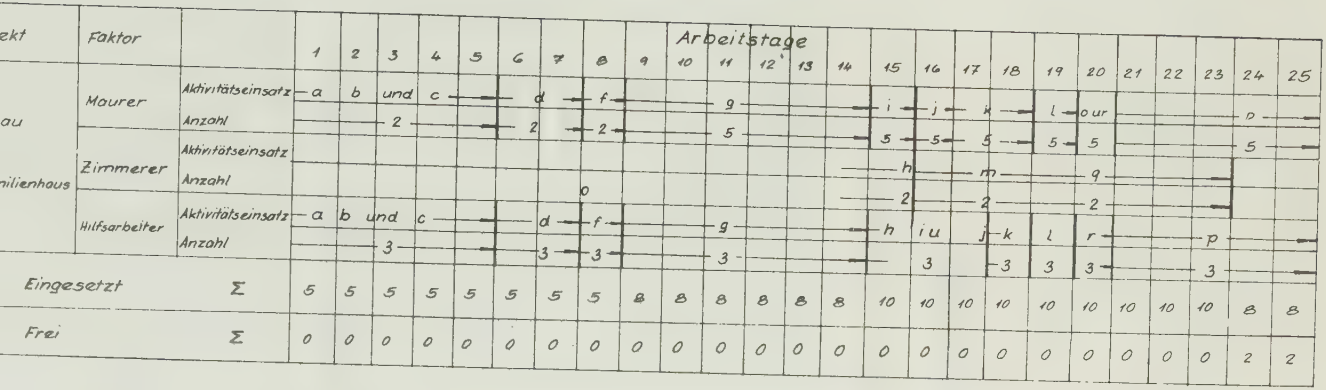
Die "Methode des Leitweges" wurde speziell im Hinblick auf die Bauindustrie entwickelt.[1] Es wird davon ausgegangen, daß sich durch jedes Bauprojekt ein Zug von Arbeitsgängen zieht, der aufgrund der technologischen Gegebenheiten zwangsläufig das Bautempo bestimmt. Dieser Leitweg ist z.B. bei einem Stahlbetonbau durch die Vorgänge Schalen, Bewehren und Betonieren vorgegeben (s. Abb. 73). Durch eine entsprechende Potentialzuordnung wird der Leitweg von Anfang an zum kritischen Weg gemacht, wobei diese Zuordnung so erfolgt, daß der geforderte Bautermin eingehalten werden kann. Die "Zubringer-Arbeiten" wie z.B. "Schalung und Bewehrung vorbereiten" (s. Abb. 73) sind dem Rhythmus der Leitaktivitäten so anzupassen, daß diese nur einen kleinen Schlupf erhalten. "Unabhängige Aktivitäten" stehen mit den Leitaktivitäten in keiner engen technologischen Beziehung. Ihr Verlauf ist meist von kurzer Dauer und diskontinuierlich. Da sie einen großen Schlupf haben, wird ihnen kein bestimmtes Produktionspotential zugeordnet. Diese Bauarbeiten werden dann ausgeführt, wenn bei den Leit- oder abhängigen Aktivitäten kurzfristig überzählige Produktionsfaktoren vorhanden sind. Unabhängige Aktivitäten bei einem Stahlbetonbau können z.B. Stemmarbeiten, Mauern von Zwischenwänden, Ausschalen oder Nacharbeiten sein.

Kritisch ist gegen die "Methode des Leitweges" einzuwenden:

1. Die Annahme, daß eine kontinuierliche taktweise Fertigung im Baubetrieb gegeben ist, trifft meist nicht zu. Es kann nicht generell unterstellt werden, daß in gleichen Zeitabschnitten gleiche Arbeitsgänge zur Ausführung kommen, wie dies bei einem Hochhausbau mit gleicher Stockwerkausführung möglich ist. Bei komplexen Großbauvorhaben mit mehreren unterschiedlichen Bauwerken und Gebäudetrakten wird ein ständiger Wechsel in der zu erstellenden Bauleistung nicht zu umgehen sein, was eine unterschiedliche Potentialbeanspruchung im Zeitablauf zur Folge hat.

---

1) Vergl. Wagner, G.: a.a.O., S. 46 ff



Arbeitskräftebeanspruchung für "Neubau eines Einfamilienhauses"
im Monat September (25 Arbeitstage)

Abb. 72

2. Die Methode des Leitweges geht davon aus, daß der kritische Weg durch die Folge der "Leitaktivitäten" technologisch vorausbestimmt ist. Hierbei bleibt jedoch unberücksichtigt, daß aufgrund von Potentialbeschränkungen auch andere Aktivitäten kritisch werden können. Sind z.B. im obigen Beispiel nicht die erforderlichen Zimmerleute für das "Vorbereiten der Schalung" verfügbar, so führt der kritische Weg nicht über die Leitaktivität "Betonieren", sondern über die Zubringer-Aktivität "Schalung vorbereiten". (s. Abb. 73)

27 Mehrprojektplanung

271 Einführung und Problemstellung

Die bislang aufgezeigten Lösungsansätze zur Optimierung von Durchlaufzeiten und Kapazitätsauslastung sind insoweit unbefriedigend, als sie sich nur auf das jeweilige Projekt beziehen. Die Interdependenz zwischen den einzelnen Planungsaufgaben bleibt unberücksichtigt. Ein betriebliches Ablaufplanungsoptimum kann man jedoch nur erreichen, wenn die Einsatzmöglichkeiten der einzelnen Produktionsfaktoren miteinander verglichen werden.

Um die gleichzeitige Planung von Projekten zu ermöglichen, wurden mehrere Methoden entwickelt wie das "Multiship, multishop, woorkload-smoothing programm", "SCANS" und RAMPS".[1] Letzterem kommt besondere Bedeutung zu, da RAMPS neben der simultanen Mehrprojektplanung eine Gewichtung einzelner miteinander konkurrierender Zielsetzungen wie: maximale Kapazitätsauslastung, Minimierung einzelner Projektzeiten, Unterbrechung möglichst weniger Aktivitäten oder Vermeidung von Arbeitsanstauungen ermöglicht. RAMPS

1) Levy, F.K.: Tompson, G.L.: und Wiest, J.D.: Multiship, multishop, workload-smoothing programm, Naval Research Logistics Quarterly 9 (1962) 1, S. 37 ff. SCANS-Literatur, a.a.O. RAMPS Training Test, C-E-I-R (U.K.) Ltd. Brentford, O.J.: RAMPS - a new development in scheduling; du Pont Engineering Progress 2 (1962)
Mc. Gee, A.A.; Markarian, M.D.: Optimum Allocation of Research/Engineering Manpower Within a Multi-Project Organizational Structure, in IRE Transactions on Engineering Management, Vol. EM - 9, Sept. 1962, S. 1-8 ff.

(Resource Allocation and Multi-Project Scheduling) ist eine "intelligente Probierstrategie" und benutzt die gleiche Netzwerkdarstellung wie CPM und PERT. Es handelt sich hierbei um ein umfangreiches Programm mit etwa 12.000 Befehlen für die Rechenanlagen IBM 7090 oder 7094. RAMPS-Programme können käuflich erworben und in Lohnarbeit durchgerechnet werden.

Die wichtigsten Eingabedaten sind:

1. Gewünschte Anfangs- und Abschlußtermine für die einzelnen Projekte.

2. Vorgabe der Netzwerkstruktur für die einzelnen Projekte.

3. Dauer der einzelnen Aktivitäten bei drei Intensitätsstufen (normal, beschleunigt, minimal).

4. Kapazitätsbedarf der einzelnen Aktivitäten bei drei Intensitätsstufen, für die Arbeitsmenge (= Anzahl x Einsatzzeit) des wichtigsten Produktionsfaktors (z.B. Facharbeiter) und die erforderlichen "Hilfsfaktoren" (Lehrlinge, Betriebsmittel und Werkstoffe).

5. Verfügbare Kapazitäten in den Betriebsabteilungen sowie Kapazitätserweiterungsmöglichkeiten.

6. Kosten der Produktionsfaktoren sowie Kosten für mögliche Kapazitätserweiterungen.

7. Steuerungsdaten wie:
   Unterbrechungsstrafen für Arbeitsgänge und
   Strafen für Terminüberschreitungen.

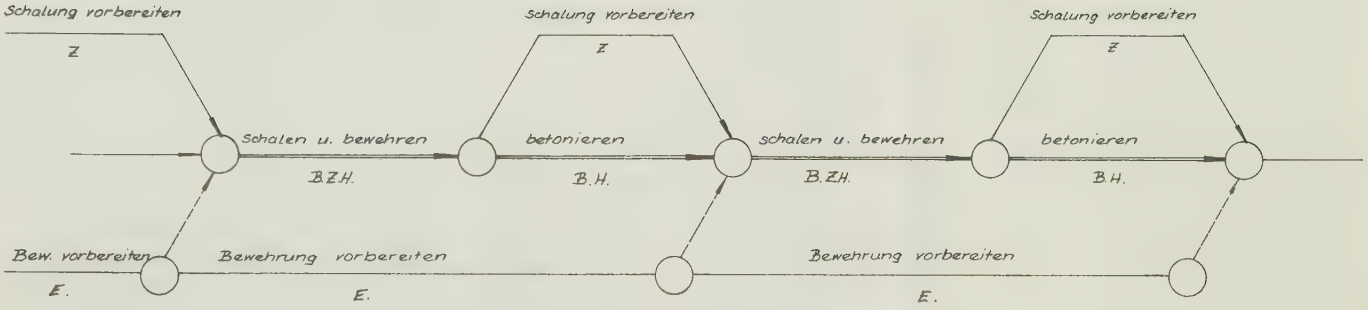
Ausgabedaten sind:

1. Terminpläne für jedes Projekt mit Angabe der Anfangs- und Endtermine aller Arbeitsgänge.

2. Kapazitätsauslastungspläne für alle Betriebsabteilungen.

3. Gesamtkosten für das Unternehmen, die gleichzeitig eine kostenoptimale Lösung sind.

4. Besondere Kosten, die z.B. durch Terminüberschreitung bedingt sind.



E. = Eisenbieger
B. = Betonbauer
Z. = Zimmerleute
H. = Hilfsarbeiter

Netzwerkausschnitt eines Stahlbetonskelettbaues

Abb. 73

Nach Angaben der Beratungsfirma CEIR sind mit RAMPS bereits 6 Projekte mit etwa 7oo Aktivitäten simultan geplant worden.[1)]

272 Zeitschätzung und Potentialzuteilung bei RAMPS

2721 Ermittlung der Arbeitsmenge

In der ersten Planungsphase ist wie bei CPM und PERT die Netzwerkstruktur festzulegen. Im Gegensatz zu diesen wird jedoch bei RAMPS bereits in der zweiten Planungsphase im Zusammenhang mit der Zeitschätzung für jede Aktivität die erforderliche "Arbeitsmenge" festgelegt.[2)] Diese ist das Produkt aus Menge des einzusetzenden Produktionsfaktors X Einsatzzeit unter "normalen" Arbeitsbedingungen. Werden z.B. für die Aktivität "Einschalen der Kellerdecke" 2 Zimmerleute für 3 Tage benötigt, dann ist hierfür eine "Arbeitsmenge" von 6 erforderlich. Neben dieser "normalen" Schätzung ist eine "Arbeitsmenge" für langsame und eine für beschleunigte Arbeitsdurchführung festzulegen. So könnte z.B. die Aktivität "Einschalen der Kellerdecke" auch 1 Zimmermann in 6 Tagen bzw. 6 Zimmerleute in 1 Tag fertigstellen. Ist bei der beschleunigten oder reduzierten Arbeitsdurchführung anzunehmen, daß diese nur mit geringerer Produktivität (work efficiency) erfolgen kann, so ist dieses durch einen entsprechenden Abminderungsbeiwert zu berücksichtigen. Beträgt dieser z.B. 75 % für die beschleunigte Durchführung der Aktivität "Einschalen der Kellerdecke", dann sind hierfür nicht 6, sondern 8 Zimmerleute erforderlich, wenn nur ein Tag zur Verfügung steht.

Aufgrund der drei unterschiedlichen Einsatzwerte - reduzierte, normale und beschleunigte Ausführung -

---

1) Vergl. RAMPS, Training Text: a.a.O., S. 5

2) "Because RAMPS uses the amount-of-work concept, it is unlike its predecessors which do not take into account the resources to be consumed." RAMPS Training Text: a.a.O., S. 3-2

ergibt sich für die Planung der einzelnen Projekte und die Verteilung der vorhandenen Produktionsfaktoren auf diese eine große Planungsflexibilität.

Man kann die Minimierung einer Projektzeit durch beschleunigte Ausführung und die Berücksichtigung von Kapazitätsbeschränkungen durch reduzierte Ausführung realisieren. Wie Abb.74 zeigt, kann z.B. das Projekt durch beschleunigte Ausführung nach 9 Zeiteinheiten beendet werden. Stehen jedoch die hierfür erforderlichen Produktionsfaktoren nicht in ausreichender Menge zur Verfügung, so muß eine normale bzw. reduzierte Ausführung erfolgen.[1)]

Besondere Bedeutung kommt im Zusammenhang mit der Beschleunigung bzw. Reduzierung von Aktivitäten der Kenntnis des kritischen Weges und der Schlupfgrößen zu. Vielfach kann im RAMPS-System die verzögerte Ausführung von kritischen Aktivitäten bei beschränktem Produktionspotential durch ein entsprechendes Verschieben der Schlupfaktivitäten umgangen werden. Stehen z.B. für die Ausführung des Projektes A 7 Arbeitskräfte zur Verfügung, kann man entsprechend Abb. 75 durch zeitliches Verschieben der nichtkritischen Aktivität (2/6) um 2 Zeiteinheiten und unter Verwendung von beschleunigter, normaler und reduzierter Ausführung ein Projektabschluß nach 15 Zeiteinheiten erreichen. Darüber hinaus ermöglichen die drei Ausführungsarten eine weitgehend gleichmäßige Auslastung des Produktionspotentials (s.Abb.75), wobei mit Hilfe von RAMPS dieser Ausgleich nicht nur - wie im obigen einfachen Beispiel - für ein Projekt und einen Produktionsfaktor, sondern für mehrere Produktionsfaktoren und verschiedene Projekte möglich ist.

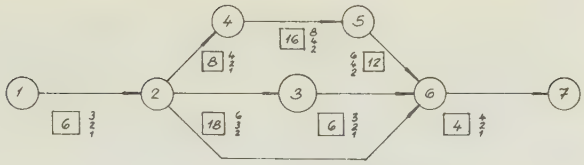
2722 Zusammenstellung der Faktorgruppe

Sind für die Durchführung einer Aktivität mehrere unterschiedliche Faktoren erforderlich, so werden diese in einem "resource team" zusammengestellt.

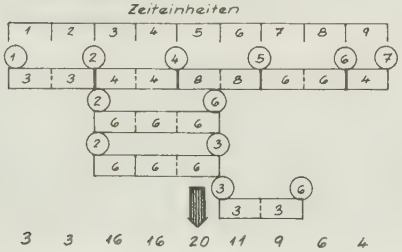
---

1) Nachfolgende Beispiele sind entnommen aus RAMPS Training Text, a.a.O.

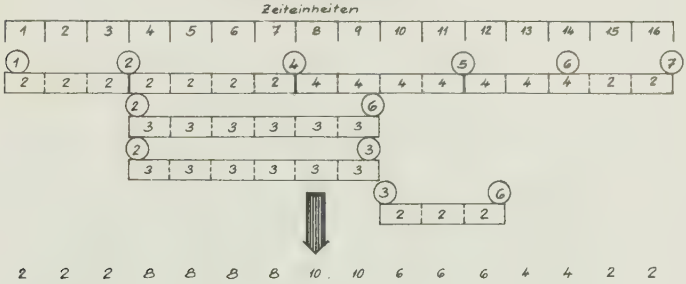
Projekt A



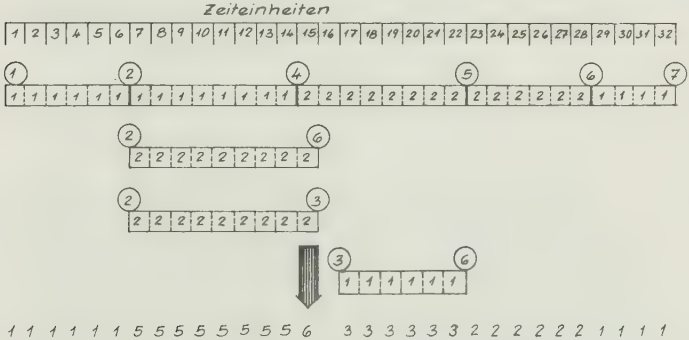
Beschleunigte Ausführung



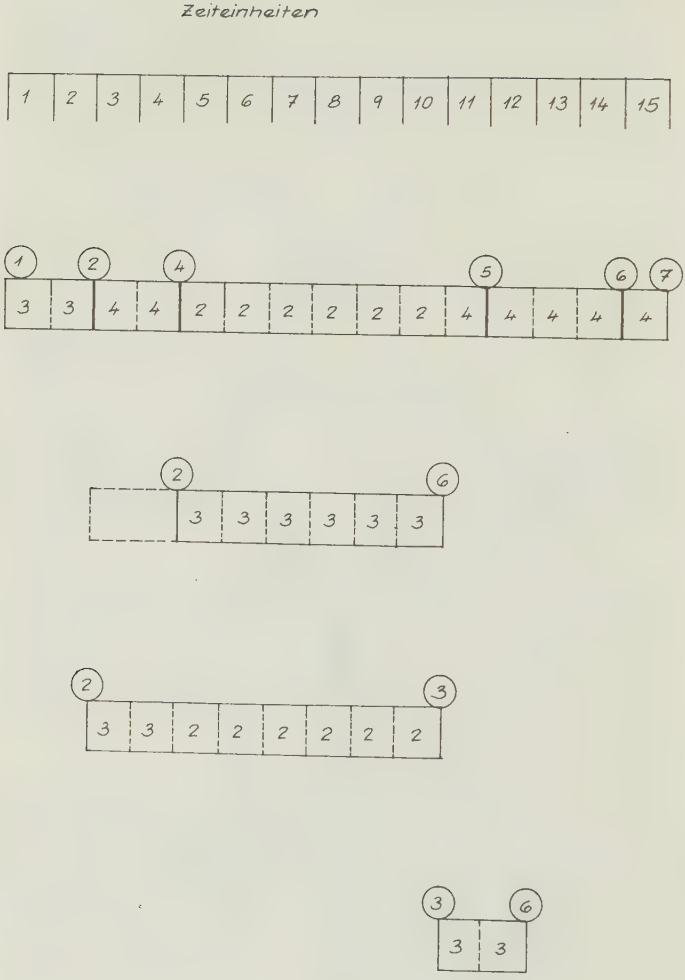
Normale Ausführung



Reduzierte Ausführung



Mögliche Projektzeiten bei unterschiedlicher Ausführungsgeschwindigkeit mit zugehöriger Potentialbeanspruchung.



Verfügbare Kräfte	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
Eingesetzte Kräfte	3	3	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	4	4	4
Freie Kräfte	4	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3	3

Abb. 75

Dieses besteht aus einem bestimmenden Faktor (lead resource) und Zubringerfaktoren (trailing resource). Dem bestimmenden Faktor kommt in der Faktorgruppe die größte Bedeutung zu, da die für die Aktivität erforderliche Arbeitsmenge nach diesem festgelegt wird. Dieser ist dadurch gekennzeichnet, daß er relativ knapp ist und die längste Zeit für die Durchführung der Aktivität eingesetzt wird.[1)]

Zubringerfaktoren sind untergeordnete Faktoren, die den Arbeitseinsatz des bestimmenden Faktors unterstützen und ermöglichen.

Es werden z.B. für die Ausführung der Aktivität "Einschalen der Kellerdecke" nicht nur Zimmerleute (bestimmender Faktor) sondern auch Schalungsmaterial und Hilfsarbeiter (Zubringerfaktoren) benötigt. Die Zubringerfaktoren sind dem bestimmenden Faktor so zuzuordnen, wie dies für die jeweilige Arbeitsausführung (beschleunigt, normal, reduziert) erforderlich ist.

2723 Verfügbare Produktionsfaktoren

Im Anschluß an die Strukturanalyse und die Ermittlung der Arbeitsmenge legt RAMPS in der dritten Planungsphase die verfügbaren Produktionsfaktoren fest. Aus der Zeitplanung und der damit verbundenen Faktorbeanspruchung durch die Aktivitäten ist bereits bekannt, welche und wieviel Produktionsfaktoren für die Durchführung der einzelnen Projekte erforderlich sind. Festzustellen ist jetzt:

1. Wieviele Einheiten der jeweiligen Produktionsfaktoren verfügbar sind.

2. Wann und wie lange diese Einheiten verfügbar sind.

---

1) "There is another, perhaps more important, consideration in selecting the lead resource: it should be the resource that is to work the longest time on the activity." RAMPS Training Text: a.a.O., S. 4 - 3

3. Die mit dem Einsatz verbundenen Faktorkosten.

Diese Angaben sind für jeden Faktor für normalen und verstärkten Arbeitseinsatz festzulegen. Letzterer ist durch Überstunden, Faktorvermehrung durch Neueinstellungen oder Weitergabe an Nachunternehmer möglich, wobei diese Maßnahmen gewöhnlich mit Zusatzkosten verbunden sind.

Dem verstärkten Arbeitseinsatz kommt besonders dann große Bedeutung zu, wenn es Zielsetzung der Unternehmungsleitung ist, das Projekt frühestmöglich zu beenden.

Auskunft über die für ein neues Projekt verfügbaren Faktoren erhält man aus dem RAMPS Report, in dem die freien Faktoren nach Menge und Zeit ausgeworfen sind. Reichen diese Faktoren nicht aus, dann können vorhandene Lücken durch verstärkten Arbeitseinsatz ausgefüllt werden. Ob und inwieweit dieses mit Hilfe von RAMPS durchgeführt wird, hängt davon ab, welche Gewichtung die einzelnen miteinander konkurrierenden Zielsetzungen durch die Planungsstelle bekommen.

2724 Steuerungsdaten

Wie bereits angedeutet, ermöglicht RAMPS nicht nur eine simultane Mehrprojektplanung, sondern darüber hinaus ist bei der Planung die Gewichtung einzelner Zielsetzungen durch Prioritätssteuerung möglich. So kann z.B. die Zielsetzung, ein bestimmtes Projekt besonders schnell durchzuführen, dadurch realisiert werden, daß diesem vorrangig die Produktionsfaktoren zugeteilt werden. Die Projektpriorität ist hierbei aufgrund der Fragen:

1. Wieviel würde es kosten, wenn das Projekt nicht rechtzeitig fertiggestellt würde?

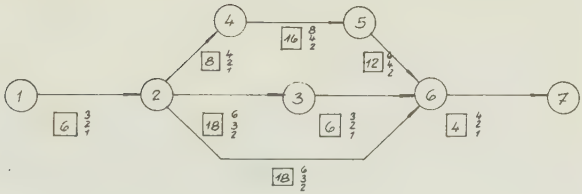
2. Wieviel könnte gespart oder zusätzlich ausgezahlt werden, wenn das Projekt vorzeitig beendet würde?

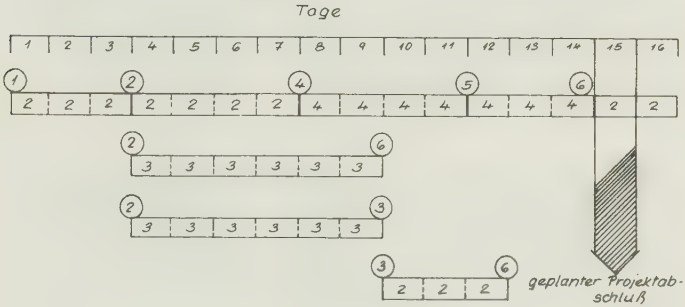
zu entscheiden.

Die relative Bedeutung der einzelnen Projekte wird im RAMPS-System durch drei Eingabedaten gekennzeichnet:

Projekt A

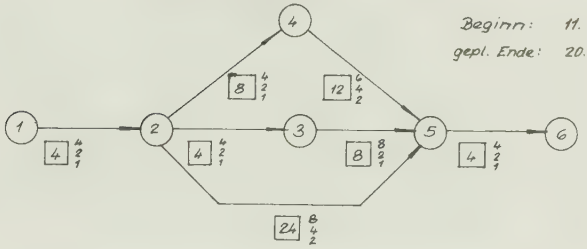
Beginn: 1.9.
gepl. Ende: 15.9.

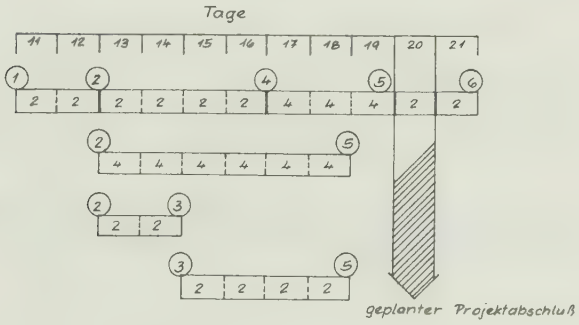




Projekt B

Beginn: 11.9.
gepl. Ende: 20.9.





Zeitlicher Ablauf der Projekte A und B unter Verwendung der "normalen Arbeitsmenge".

1. Zeitpunkt des Projektstartes

2. Geplanter Projektabschluß

3. Projektverzugsstrafen.

Sollen die in Abb. 76 dargestellten Projekte A (B) am 1. Sept. (11. Sept.) beginnen und am 15. Sept. (2o. Sept.) beendet sein, zeigt sich, daß die termingerechte Fertigstellung beider Projekte unter ausschließlicher Verwendung der "normalen Arbeitsmenge" nicht möglich ist. Unterstellt man, daß aufgrund der Potentialbeschränkung nur ein Projekt beschleunigt werden kann, wählt RAMPS dieses Projekt aufgrund der höheren Verzugsstrafe aus.

Neben der Projektpriorität kann RAMPS mit Hilfe von Kontrollfaktoren (Control factors) die Gewichtung einzelner miteinander konkurrierender Zielsetzungen durchführen, wodurch eine Zielhierarchie entsteht. Die einzelnen Kontrollfaktoren, ihre Auswirkung auf den Ablaufplan und die zugehörige Planungszielsetzung sind aus Abb. 77 zu entnehmen.

Vier Kontrollfaktoren - das sind Gesamtschlupf, freier Schlupf, Voraussicht und Arbeitsfortsetzung - beziehen sich direkt auf die einzelnen Aktivitäten und entscheiden, wieviele Faktoren der jeweiligen Aktivität zugeteilt werden. Die beiden Kontrollfaktoren "Zahl der Aktivitäten" und 'Freie Faktoren" beziehen sich hingegen auf die Gesamtheit aller in der Periode zur Ausführung kommenden Aktivitäten, wobei die Zielsetzungen "Maximierung der bearbeiteten Aktivitäten" und "Minimierung des Produktionsfaktorleerlaufes" angestrebt werden.

Der "Gesamtschlupffaktor" teilt die Faktoren den Aktivitäten so zu, daß diejenigen mit dem geringsten Gesamtschlupf zuerst versorgt werden. Da kritische Aktivitäten keinen Gesamtschlupf haben, bewirkt eine hohe Gewichtung des Gesamtschlupffaktors, daß ein frühestmöglicher Projektabschluß erreicht wird.

Der "Freie Schlupf-Faktor" bevorzugt die Aktivitäten mit kleinem oder keinem freien Schlupf. Hierdurch erreicht man zwei Ziele:

Kontrollfaktor	Auswirkung auf den Ablaufplan	Planungszielsetzung
Gesamtschlupf Freier Schlupf	Priorität für kritische Aktivitäten	Minimierung der Projektdauer
Voraussicht	Gibt den Aktivitäten Priorität, die eine große Zahl von Folgeaktivitäten haben.	Vermeidung von Engpässen
Arbeitsfortsetzung	Priorität für früher gestartete und noch nicht beendete Aktivitäten.	Vermeidung von Unterbrechungen
Zahl der Aktivitäten	Priorität für den Start möglichst vieler Aktivitäten	Maximierung der bearbeiteten Aktivitäten
Freie Faktoren	Priorität für den Einsatz freier Faktoren	Minimiere den Leerlauf von Produktionsfaktoren

Abb. 77

1. Projektbeschleunigung durch Priorität für die kritischen Aktivitäten.

2. Priorität für Aktivitäten mit interferierendem (bedingt verfügbarem) Schlupf und dadurch Vermeidung von Engpässen bei mehr als einem kritischen Weg.

Aus Abb. 78 folgt, daß Aktivität 1 – 4 nicht ohne Beeinträchtigung der Start- und Abschlußzeitpunkte der Aktivitäten 4 – 5 und 5 – 6 verschiebbar ist. Wird die Aktivität 1 – 4 um 2 Tage verlängert, so entsteht ein zweiter kritischer Weg über die Aktivitäten 1 – 4, 4 – 5 und 5 – 6, und es sind jetzt zwei kritische Wege ohne Verzögerung und reduzierte Arbeitsmenge durchzuführen. Die Prioritätsverteilung erfolgt deshalb entsprechend Abb. 78.

Der Voraussichtkontrollfaktor gibt den Aktivitäten Priorität bei der Faktorzuteilung, die eine große Zahl von Folgeaktivitäten haben (Abb. 79). Durch diese vorbeugende Maßnahme können spätere evtl. Verzögerungen vorzeitig aufgefangen werden.[1)]

Der Kontrollfaktor "Arbeitsfortsetzung" gibt allen bereits begonnenen Aktivitäten Priorität, für die gleichfalls eine hohe Unterbrechungsstrafe angesetzt ist (s.Abb. 8o). Hierdurch kann berücksichtigt werden, daß einige Aktivitäten mit großen Anlaufkosten verbunden sind und eine Unterbrechung deshalb möglichst zu vermeiden ist. Empfindlich gegen Unterbrechungen sind hingegen alle Aktivitäten ohne Unterbrechungsstrafen.

Obgleich den Aktivitäten 2 – 4 und 2 – 8 in Abb. 8o eine Unterbrechungsstrafe zugeteilt ist, können diese dennoch unterbrochen werden, da dem Kontrollfaktor "Arbeitsfortsetzung" in diesem Beispiel eine geringe Bedeutung zukommt.[2)]

---

1) Vergl. RAMPS Training Text: a.a.O., S. 6 – 13: "In this way, RAMPS takes early preventive action against work build-ups later that could possibly delay completion of the project."

2) "When the possibility of interrupting an activity exists, RAMPS weights the value of the interrupt factor and the interrupt penality for the activities involved to determine the feasability of interruption," RAMPS Training Text: a.a.O., S. 6 – 14

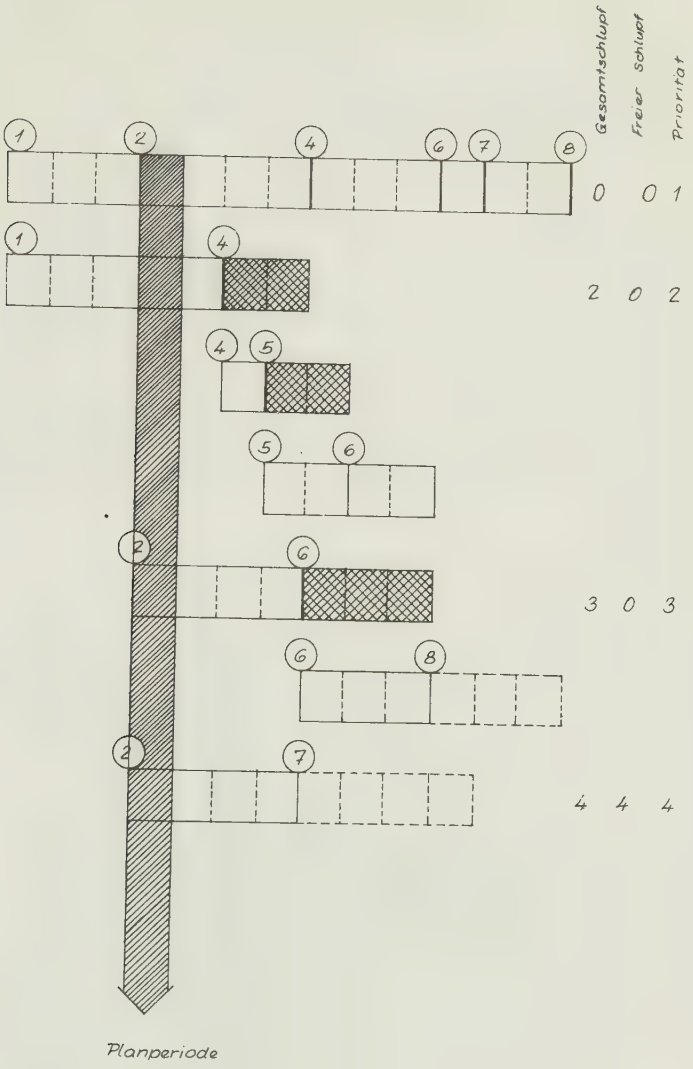

Gesamtschlupf
freier Schlupf
Priorität
1
2
4
6
7
8
0 0 1
1
4
2 0 2
4
5
5
6
2
6
3 0 3
6
8
2
7
4 4 4
Planperiode

Abb. 78

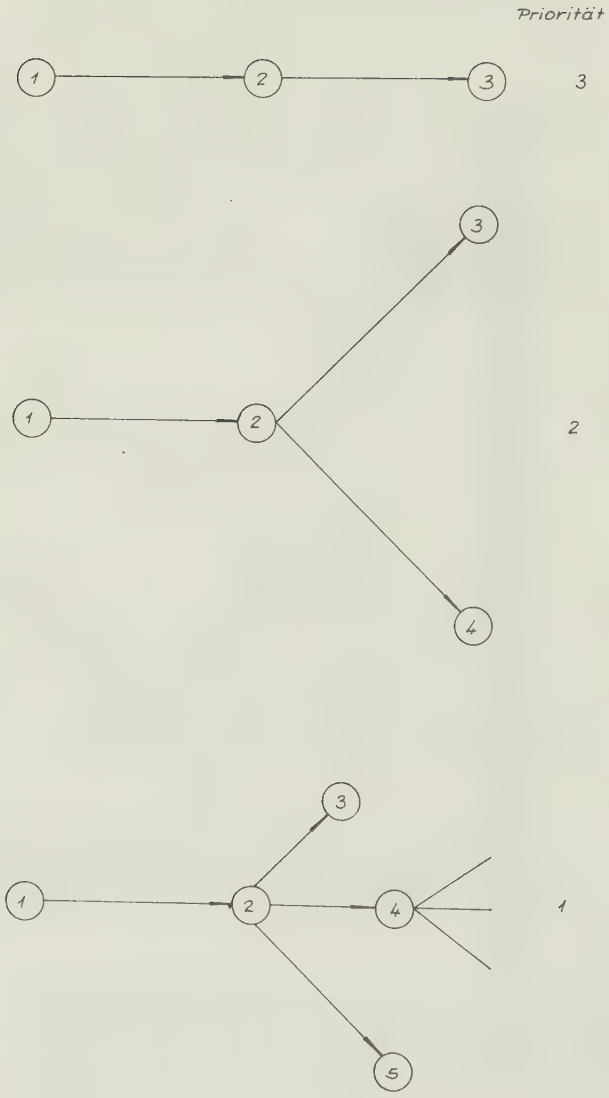


Abb. 79

Kontrollfaktor Gewichtung		Aktivität	Unterbrechungsstrafe
Freie Faktoren	100	2 - 4	100 DM
Zahl der Aktivitäten	50	2 - 6	0 DM
Gesamtschlupf	25	2 - 8	50 DM
Freier Schlupf	25		
Arbeitsfortsetzung	20		
Voraussicht	10		

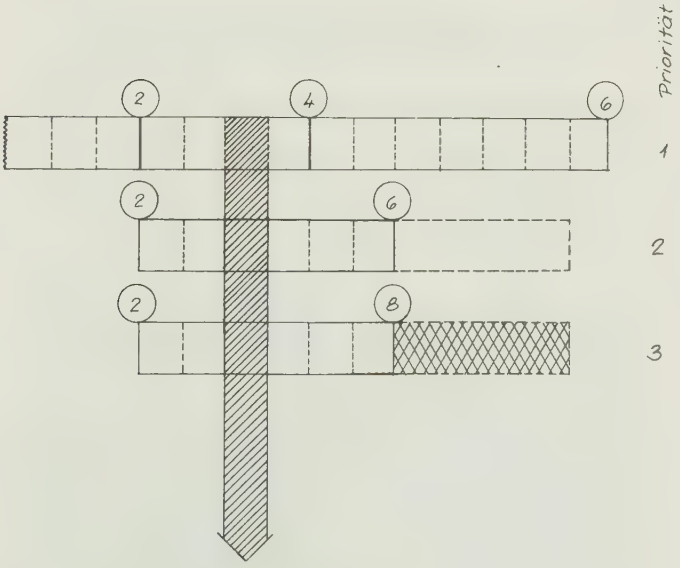


Abb. 80

Durch hohe Gewichtung des Kontrollfaktors "Zahl der Aktivitäten" wird erreicht, daß möglichst viele Aktivitäten mit reduziertem Arbeitseinsatz durchgeführt werden. Die beschränkt verfügbaren Produktionsfaktoren werden durch diese Maßnahme auf möglichst viele Aktivitäten aufgeteilt, so daß die einzelnen Projektausführungszeiten verlängert werden.

Der Kontrollfaktor "Freie Faktoren" strebt eine maximale Auslastung des Faktorpotentials an, um Leerlaufkosten zu vermeiden.

Die Möglichkeit, die miteinander konkurierenden Zielsetzungen zu gewichten und eine Zielhierarchie aufzustellen, sowie die Eingabe von unterschiedlichen "Arbeitsmengen" für die Ausführung der Aktivitäten machen RAMPS zu einem umfassenden und flexiblen Planungsinstrument.

Der mit dem RAMPS-System verbundene hohe Planungsaufwand wird jedoch den Anwendungsbereich in der Bauindustrie einschränken.

273 Mehrprojektplanung mit einem Strategieplan

Der große Speicheraufwand von RAMPS ist

1. durch die Vielzahl der Entscheidungsmöglichkeiten und
2. durch das Lösungssystem der "intelligenten Probierstrategie" bedingt.

Eine praxisnahe Lösung für simultane Mehrprojektplanungsaufgaben von Bauprojekten - ohne die Verwendung eines Computers - ist mit Hilfe eines Strategieplanes (s. Abb. 81) möglich. Bevor mit diesem ein gesamtbetriebliches Kosten- Gewinn- Optimum ermittelt wird, ist für die einzelnen Bauprojekte die (kostenoptimale) Projekt-Zeitdauer und die zugehörige Potentialbeanspruchung (wie bereits in anderem Zusammenhang ausgeführt) zu bestimmen. Im Strategieplan werden dann die für die Durchführung der einzelnen Bauvorhaben erforderlichen Produktionsfaktoren zusammengestellt und die begrenzt verfügbaren Kapazitäten entsprechend ihrem geringsten Nutzenentgang aufgeteilt.

Strategieplan

Auswirkungen / Politik	Faktorbeanspruchung I	II	III	Einschränkung der übrigen Bauten A	B	C	D	Σ	gewichtete %	%
[0.2] Gewichtungsfaktor	2	20	10	-	2	10	0	12	43	8,6
Projekt A Hochhaus	[2]	[19]	[10]							
[0.4] Gewichtungsfaktor	10	2	4	2	-	2	0	4	14	5,6
Projekt B Wohnblock	[9]	[2]	[4]							
[0.4] Gewichtungsfaktor	2	15	5	10	2	-	0	12	43	17,2
Stahlbetonbrücke	[2]	[9]	[5]							
[0.8] Faktor	-	-	15	0	0	0	-	-	-	-
Straßen- u. Erdbau			[15]							
erforderlich	14	37	34							
verfügbar	13	30	34							
Differenz	-1	-7	0							

Legende:

Faktor I = Maurer
Faktor II = Zimmerleute
Faktor III = Sonstiges

[zugeteilte Faktoren]

Gewichtungsfaktoren von:
0,1 (große Bedeutung) —— 0,9 (kleine Bedeutung)

Einschränkungsfaktoren von:
0 (keine Einschränkung) —— 10 (große Einschränkung)

Für die simultane Mehrprojektplanung der vier Projekte:

A Hochhaus als Stahlbetonskelettbau

B Wohnblock

C Stahlbetonbrücke

D Straßen und Erdbau

folgt aus dem Strategieplan:

1. Die Ausführung des Projektes D (Straßen und Erdbau) beeinträchtigt die übrigen Bauvorhaben nicht, da die für Projekt D benötigten Produktionsfaktoren der Gruppe III (z.B. Hilfsarbeiter, Maschinisten) ausreichend zur Verfügung stehen.

2. Die geplante Ausführung der Projekte A, B und C ist wegen der Faktorbeschränkungen der Gruppen I und II c.p. nicht gleichzeitig möglich.

3. Eine optimale Zuordnung der knappen Produktionsfaktoren erfolgt über einen gewichteten Beschränkungsfaktor. Grundgedanke ist hierbei, daß dasjenige Projekt mit Produktionsfaktoren bevorzugt versorgt wird, das die geringsten Einschränkungen bei den übrigen Bauvorhaben zur Folge hat. Voraussetzung ist die Kenntnis der technologischen Verhältnisse und Abhängigkeiten. Die Einschränkungen werden durch Kennzahlen im Strategieplan wiedergegeben, wobei diese von 0 (keine Einschränkung) bis 10 (große Einschränkung) gehen. Da sowohl Projekt A (Stahlbetonskeletthochhaus) als auch B (Stahlbetonbrücke) wegen der dominierenden Einschalarbeiten einen starken Bedarf an Zimmerleuten (Faktor II) hat, entsteht eine große gegenseitige Einschränkung. Für Projekt B (Wohnblock) als Mauerwerksbau ist hingegen die kleinste Σ der Einschränkungen (2 + 2 = 4) gegeben. Setzt man deshalb bevorzugt am Projekt B die erforderlichen Produktionsfaktoren ein, so ist der entgangene Nutzen am kleinsten und ein optimaler Einsatz der knappen Produktionsfaktoren erreicht.

Die Aufteilung der knappen Faktoren erfolgt im Strategieplan im umgekehrten Verhältnis der Einschränkungen (kleine Einschränkung = große Zuteilung), wobei die Prozentsätze vorher mit einem Gewichtungsfaktor multipliziert werden. Dieser ermöglicht in Anlehnung an RAMPS eine größere Planungsflexibilität.

Hierdurch kann berücksichtigt werden, daß in der Baupraxis den einzelnen Bauvorhaben eine unterschiedliche Bedeutung beigemessen wird (Bauherr, langfristige Auftragspolitik, Eigenart des Bauvorhabens, Konventionalstrafen, Zahlungsweise).

Für obiges Beispiel erhält man folgende gewichtete Prozentsätze (s. Abb. 81):

Projekt A = 8,6 %

Projekt B = 5,6 %

Projekt C = 17,2 %,

und die zugehörige Faktorzuordnung folgt aus:

$$X_A = \frac{M \times \frac{1}{a}}{\Sigma \frac{1}{a} + \frac{1}{b} + \frac{1}{c} \ldots \frac{1}{n}} \quad ,$$

wobei

X_A = Anzahl der zugeteilten Faktoren für das Projekt A,

M = Anzahl der jeweils verfügbaren Faktoren,

$\frac{1}{a}, \frac{1}{b}, \frac{1}{c}$ = gewichtete Beschränkungsprozente.

Die Zuteilung des beschränkten Faktors I auf die Projekte A, B und C ergibt dann:

$$X_A = \frac{13 \times \frac{1}{8,6}}{\Sigma \frac{1}{8,6} + \frac{1}{5,6} + \frac{1}{17,2}} = 4,28 \text{ Einheiten}$$

$$X_B = \frac{13 \times \frac{1}{5,6}}{\Sigma \frac{1}{8,6} + \frac{1}{5,6} + \frac{1}{17,2}} = 6,58 \text{ Einheiten}$$

$$X_C = \frac{13 \times \frac{1}{17,2}}{\Sigma \frac{1}{8,6} + \frac{1}{5,6} + \frac{1}{17,2}} = 2,14 \text{ Einheiten}$$

Da die Projekte A und C jedoch nur jeweils 2 Einheiten des Faktors I benötigen, ist die endgültige Zuteilung des Faktors I :

$X_A = 2$; $X_B = 9$; $X_C = 2$,

und der Fehlbedarf des Faktors I von einer Einheit geht zu Lasten des Projektes B.

Entsprechend folgt für Faktor II:

$$X_A = \frac{30 \times \frac{1}{8,6}}{\Sigma \frac{1}{8,6} + \frac{1}{5,6} + \frac{1}{17,2}} = 9,86 \text{ Einheiten}$$

$$X_B = \frac{30 \times \frac{1}{5,6}}{\Sigma \frac{1}{8,6} + \frac{1}{5,6} + \frac{1}{17,2}} = 15,20 \text{ Einheiten}$$

$$X_C = \frac{30 \times \frac{1}{17,2}}{\Sigma \frac{1}{8,6} + \frac{1}{5,6} + \frac{1}{17,2}} = 4,94 \text{ Einheiten}$$

Da Projekt B von den 15,2 zugeteilten Einheiten des Faktors II jedoch nur 2 Einheiten benötigt, werden die verbleibenden 13,2 Einheiten wie folgt auf Projekt A und C aufgeteilt.

$$X_A = \frac{13,2 \times \frac{1}{8,6}}{\Sigma \frac{1}{8,6} + \frac{1}{17,2}} = 8,8 \text{ Einheiten}$$

$$X_B = \frac{13{,}2 \times \frac{1}{17{,}2}}{\Sigma \frac{1}{8{,}6} + \frac{1}{17{,}2}} = 4{,}4 \text{ Einheiten}$$

Die endgültige Zuteilung des Faktors II ist dann

$X_A = 9{,}86 + 8{,}8 = 18{,}66$	—	19 Einheiten
$X_B =$		2 Einheiten
$X_C = 4{,}94 + 4{,}4 = 9{,}34$	—	9 Einheiten
	Σ	30 Einheiten

Der Fehlbedarf des Faktors II von 7 Einheiten geht somit mit einer (6) Einheit(en) zu Lasten von Projekt A (B).

Inwieweit es möglich und wirtschaftlich sinnvoll ist, den Fehlbedarf durch geeignete Maßnahmen (Überstunden, Einsatz anderer Produktionsfaktoren und -verfahren, Vergabe von Arbeiten an Subunternehmer) zu kompensieren, ist eine Tatfrage. Sind diese nicht gegeben, so müssen Terminverlängerungen in Kauf genommen werden.

3 Schlußbetrachtung

Bei der Einführung der Netzwerkplanung zeigt sich, daß – wie beim Schachspiel – die Spielregeln leicht zu erlernen sind, während eine vollendete Beherrschung der Technik viel Übung erfordert.[1] Das gilt besonders für die Zeitschätzungen und die Vorgabe der Beschleunigungskosten. Weiterhin muß man sich von der Vorstellung befreien, daß die Ausführung eines Bauprojektes nur an Ablauf und Zeit gebunden ist und sich auf die netzplanbedingte struktuelle Darstellung von Folgen und Beziehungen umstellen.[2]

Abweichungen gegenüber den Soll-Werten sind jedoch nie ganz zu vermeiden. Diese Fehlerquellen bestehen gleichfalls bei den herkömmlichen Planungsverfahren. Im Gegensatz zu diesen ist aber bei der Netzwerkplanung der Fehler schnell erkannt und berichtigt. Pocock bringt in diesem Zusammenhang folgenden treffenden Vergleich:[3]

Die herkömmliche Projektplanung entspricht einem Kanonenschuß. Dieser wird abgefeuert, zieht seine Bahn und wird bei richtiger Zieleinstellung treffen. Die Netzwerkplanung entspricht einer lenkbaren Rakete, die gleichfalls abgeschossen wird und bei richtiger Zieleinstellung trifft. Sind jedoch die Ausgangsdaten für die Zielbestimmung nicht richtig, kann der Raketenflug – im Gegensatz zur Kanonenkugel – auch noch nach dem Abschuß korrigiert und in das Ziel gelenkt werden.

Mit Hilfe der Netzplantechnik können diese "Fehler" nicht nur rechtzeitig erkannt und korrigiert, sondern darüber hinaus kann, durch Kenntnis des kritischen Weges, die Bedeutung von Planabweichungen beurteilt werden.

---

1) Vergl. Dean, K.L.: a.a.O., S.7: "Learning how to use the Network Technique is somewhat analogous to learning how to play checkers or bridge or chess. The fundamentals can be taught rapidly but perfecting the skill is a continous process".

2) Vergl. Budil, W.: Die Praxis der Netzwerktechnik, a.a.O., S. 375

3) Pockock, I.W.: PERT as an Analytical Aid for Program Planning its Payoff and Problems, Operations Research, Vol. 1o No. 6, 1962, S. 9o1

Für den Baubetrieb ist die Netzwerkplanung ein "geradezu prädestiniertes Planungsinstrument"[1], da hiermit die für optimale Planungsentscheidungen erforderlichen Informationen über Dauer, Kosten und Potentialbeanspruchung - unter Berücksichtigung der "Eigengesetzlichkeit der Bauproduktion" - bereitgestellt werden können. Der Planungschef der "Catalytic Construction Company" meint deshalb auch: "Einer der größten Fortschritte in der Planung von Bauvorhaben seit der Zeit der Pharaonen, so gut, daß ich wünschte, ich könnte das Verfahren geheimhalten.[2]"

1) Budil, W.: a.a.O., S. 375

2) Sayer, Kelly, Walker: Critical Parth. Scheduling, a.a.O., S. 74

Literaturverzeichnis

AC Spark Plug Division, General Motors Corporation: Pert-program evaluation review technique; Milwaukee 1962

Agthe, R. u. Schnaufer, E.: Unternehmensplanung, Baden-Baden 1963

Algan, M.: Reihenfolgeprobleme und Graphentheorie; in: Unternehmensforschung, Bd. 8, 1964, Heft 2, S. 53 ff.

Reihenfolgeprobleme und Graphentheorie; Metra 2, 1963, 1 S. 5 ff.

Alpert, L. and Orkand, D.L.:"A Time Resource Trade-Off Model for Aiding Management Decisions", Technical Paper No. 12 Operations Research Inc., Silver Springs, Maryland/1962

Angermann, A.: Unternehmerische Entscheidungen und Operations Research; in: Betriebsführung und Operations Research, Frankfurt/M. 1963

Anon: Engineering Attacks the Profit Squeeze. Low Selling Price - High Production Costs; in: Chemical Engineering, Jan. 8, 1962, S. 83 ff.

Ashley, W.F. and Austin, M.T.: Case Studies in Network Planning Scheduling and Control of Research and Development Projects; in: Operations Research and Development

Astrachan, A.: Better Plans Come From Study of Anatomy of an Engineering Job; in: Business Week, March 21, 1959, S. 60 ff.

Backer, F.; Barkson, A.W.; Frishberg, M.C.: Least-Cost Estimating and Scheduling; in: The Oil and Gas Journal, Jhg. 59, Nov. 13, 1961, S. 170 ff.

Bellman, R. Kelaba, R.: On the k-th Best Policies. In: J. Soc. Indust. Appl. Mathem. 8, 1960, S. 582 ff.

Bellman, R.: On a Routing Problem; in: Q. Appl. Math., Vol. XVI, No. 1, April 1958, S. 87 ff.

Berman, H.: The Critical-Path Method for Project Planning and Control; in: The Constructor, Sept. 1961, S. 24 ff.

Try Critical-Path Method to Cut Turn around Time 20 Percent, in: Hydrocarbon Processing and Petroleum Refiner, January 1962, S. 135 ff.

Beuermann, G.: CPM und PERT als Instrumente der Ablaufplanung; Dipl.-Arbeit, Göttingen 196

Bigelow, Clifford George: Bibliography on project planning and control by network analysis 1959 - 61. Operations Research 10 (1962), 5 Sep Okt., S. 728 - 31

Bildson, R.A.; Gillespie, J.R.: Critical-Path Planning - Pert Integration; In: The Journal of the Operations Research Society of America, Vol. 10 No. 6 (1962), S. 909 ff.

Breu, Max: Netzplantechnik im Terminwesen, in: Industrielle Organisation 31 (1962), Heft 10, S. 299 f.

Budil, W.: Die Praxis der Netzwerkplanung; in: Industrielle Organisation, Heft 11 (1963 S. 373 ff.

Die Praxis der Netzplantechnik; in: Industrielle Organisation, Heft 8 (1964) S. 303 ff.

Burkhardt, G.: Kostenprobleme der Bauproduktion, Wiesbaden-Berlin 1963

Numerische Ablaufplanung einer Baustelle, Wiesbaden 1966

Cabell, C.P.: Integrated Programming - Simplified Version of Pert; in: Plant Engineering, Sept. 1962, S. 106 ff.

Catalytic Construction Co. Philadelphia, Pa.: Critical Path Technique

Ceir, Inc.: Resource Allocation and Multi-Project Scheduling. Preliminary Description, Arlington 1961

Ramps-resource, allocation, and multi-project Scheduling System. Training text Washington, Ceir (UK) Ltd. An introduction to the use of Ramps.

Charnes, A.; Cooper, W.W.: A network interpretation and a directed subdual algorithm for critical-path scheduling; in: The Journal of Industrial Engineering 13 (1962) 4 Jul., S. 213 - 19

Charnes, A.; Cooper, W.W. and Thompson, G.L.: Critical Path Analysis Via Chanee Constrained and Stochastic Programming; in: Operations Research Vol. 12 (1964), No. 3, S. 460 ff.

Christensen, B.M.: Network Models for project scheduling, Phoenix 1962

Clark, Ch.E.: The Optimum Allocation of Resources Among the Activities of a Network. In: The Journal of Industrial Engineering Vol. 12 (1961), No. 1, S. 11 ff.

The Greatest of a Finite Set of Random Variables; in: The Journal of the Operations Research Society of America, Vol. 9 (1961) No. 2, S. 145 ff.

The Pert Model For The Distribution of an Activity Time; in: The Journal of the Operations Research Society of America, Vol. 10 No. 3, 1962, S. 405 ff.

Clarke, Roderick, W.: An introduction to critical-path analysis. Standford: Graduate School of Business. Standford University 1961

Computer Dynamics Corporation: " Computer Services for Industry and Government (Impact), Silver Springs

Daniels, H.J.:	Moderne Verfahren in der betrieblichen Planung - CPM und PERT als Planungsinstrumente; in: Betriebswirtschafts-Magazin, H. 15, 1963, S. 747 ff.
Danzig, G.B.:	On The Shortest Route Through A Network; in: Management Science, Vol. 6, 1960, S. 187 ff.
Dean, B.V. (ed.):	Operations Research in research and development, N.Y. 1963 Operations Research in research and development, New York 1963
Dean, K.L.:	Fundamentals of Network Planning and Analysis. Sonderdruck der Remington Rand Univac, Military Department, PX 1842 B, Jan. 1962 Deutsch: Planung mit PERT und CPM UVF Operations Research, Mitteilung No. 233023162, Remington Rand Univac 1962
Department of the Navy Pert-Literatur, Washington:	US Government Printing Office 1960-61
Divo-Institut:	Die Metra-Potential-Methode, Frankfurt a.M. 1966
Dooley, Arch.R.:	Interpretations of PERT; in: Haw. Bus. Review, March/April 1964, S. 160 ff.
Drees, G.:	Die Bedeutung der Arbeitsvorbereitung für einen rationellen Bauablauf; in: Baubetriebsberater Nr. 5, 1964, S. 65 ff.
Eisner, H.:	A Generalized Network Approach To The Planning and Scheduling of a Research Project; in: The Journal of the Operations Research Society of America, Vol. 10/No. 1, 1962, S. 115 ff.
Ellinger, Th.:	Ablaufplanung, Stuttgart 1959

Enrick, N.L.: PERT – eine neue Planungstechnik; in: Maschine und Manager, Jg. 1964, Nr. 1, S. 17 ff.

"Management Operations Research", New York 1964

Entelek, Inc.: Programmed Instruction in PERT/CPM; Newburyport, Mass., 1962

Falkenhausen, H.v.: Einführung in Zielsetzung und Methoden der Netzplantechnik; AAL-Nachrichten Nr. 30 (1964), S. 19 ff.

Fazar, W.: Programm Evaluation and Review Technique; in: The American Statistician, Vol. 13/No. 2, 1959, S. 10 ff.

Federal Electric Corporation: PERT, München 1965

Fisher, H.; Thomson, G.L.: "Probabilistic Learning Combinations of Local Job Shop Scheduling Rules"; in: Industrial Scheduling (Hersgeb. Muth, J.F. und Thomson, G.L.) Prentice Hall, Englewood Cliffs, New York 1963

Fondahl, J.A.: A Noncomputer Approach to the Critical-Path Method for the Construction Industry, Standford, Calif. 1961

Ford, L.R.Jr.: "A Network Flow Theory", Rand Paper P-923, 1956

Ford, L.R.; Fulkerson, D.R.: A Simple Algorithm For Finding Maximal Network Flows and an Application To the Hitchcock Problem; in: The Canadian Journal of Mathematics; Vol. 9/No. 2, 1957, S. 210 ff.

Flows in Networks, Princeton, New Jersey, 1962

Ford, L.R.Jr. and Fulkerson, D.R.: "Maximal Flow Through a Network", in: Canadian Journal of Mathematics, 8 (1956), S. 399 - 404

"A Simple Algorithm for Finding Maximal Network Flows and an Application to the Hitchcock Problem", in: The Canadian Journal of Mathematics, 9 (1957), S. 210 - 218

Ford, L.R.Jr. and Fulkerson, D.R.: "Constructing Maximal Dynamic Flows from Static Flows", in: Operations Research 6 (1958), S. 419 - 433

Flows in Networks; Princeton University Press 1962

Freeman, R.F.: Development Evaluation and Specification Modification in: Operations Research in Research and Development, S. 239 ff.

A Generalized Network Approach to Project Activity Sequencing; in/ IRE Transactions on Engineering Management, Dec. 1960, S. 103 ff.

A Generalized PERT, in: The Journal of the Operations Research Society of America, Vol. 8/No. 2, 1960, S. 281 ff.

Frishberg, M.C.: Less Tells You How Project is Doing; in: Hydrocarbon Processing and Petroleum Refiner, Vol. 41/No. 2, Febr. 1962, S. 130 ff.

Fulkerson, D.R.: Expected Critical Path Lengths in Pert Networks; in: The Journal of the Operations Research Society of America, Vol. 10/No. 6, 1962, S. 808 ff.

A Network Flow Computation For Project Cost Curves; in: The Management Science, Vol. 7 No. 2, Jan. 1961, S. 167 ff.

Gabriel, N.; Stilian (and others): PERT an new management Planning and Control Technique, New York 1962, 3. Aufl.

General Electric Computer Department:

1. GE - 225 Project Monitor and Control Method; Phoenix, Ariz. 1963
2. Promoon
3. Critical Path Method
4. Network Models for Project Scheduling 1963
5. GE - 225 Critical Path Method Program 1962

Giffler, J. and Thomson, G.L.: Algorithm for Solving Production Scheduling Problems; in: Operations Research 8 (1960), S. 487 - 503

Goldberg, Charles R.: An Algorithm for the Sequential Solution of Schedule Networks; in: Operations Research, Vol. 12 (1964), No. 3, S. 499 ff.

Gomory, R.E. and Hoffman, A.J.: Finding Optimum Combinations, in: Sonderdruck aus "International Science and Technology, July 1962

Gossmann, H.: Grundlagen der Fertigungsorganisation im Bauwesen, Berlin 1961

Gross, O.: The Bottleneck Assignment Problem. The Rand Corporation Paper P - 1630, March 6, 1959 presented at Rand Symposium on Math. Programming 1959

Grothus, H.: "Critical Path"; in: Production 1964, Heft 1, S. 20 - 23

Grubbs, F.E.: Attempts to Validate Certain PERT Statistics or Picking on Pert; in: The Journal of the Operations Research Society of America, Vol. 10/No. 6, 1962, S. 912 ff.

Gsell, P.: Netzwerkplanung mit PERT; in: Bull'-Nachrichten, Heft 1, Febr. 1964, S.6 ff.

Gutenberg, E.: Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre, Bd. 1: "Die Produktion", 5. Aufl., Berlin - Göttingen - Heidelberg 1960

Hansen, B.J.: Impact on implementation planning and control technique for managing the development of computer systems, Silver Spring 1963

Hardgrave, W.W. and Nemhauser, G.L.: On The Relation between The Traveling-Salesman and the Longest-Path Problems; in: Operations Research, 1962, Vol. 10 No. 5, S. 647 ff.

Healy, T.L.: Activity Subdivision and PERT Probability Statements; in: The Journal of the Operations Research Society of America, Vol. 9/No. 3, 1961, S. 341 ff.

Heiman, D.W.: Operations Research as Applied to Construction; in: Management Technology, Vol. 1 (1960) No. 2, S. 20 ff.

Heineken, W.: Exakte Methoden der Unternehmensführung, Karlsruhe 1963, S. 87 ff.

Heller, J.; Logemann, G.: An Algorithm for the Construction and Evalution of Feasible Schedules; in: Management Science, Vol. 8, 1962, S. 168 ff.

Hinty, G.J.: "A Comment on the Shortest-Route Problem"; in: Operations Research 5 (1957), S. 724

Hoffman, W.; Pavley, R.: Applications of Digital Computers to Problems in the Study of Vehicular Traffic; in: Proc. of the Western Joint Computer Conference, May 1958, S. 159 ff.

Holzer, H.P. u. Karling, F.: Netzwerkanalysen als Mittel der Planung; in: Die Wirtschaftsprüfung 17 (1964), S. 145 - 149

Hess, K.: Fertigungsablaufplanung mittels operationsanalytischer Methoden unter besonderer Berücksichtigung des Ablaufplanungsdilimmas in der Werkstattfertigung; Diss. Darmstadt 1963

Hess, L.: Fertigungsablaufplanung mittels operationsanalytischer Methoden; Würzburg-Wien, 1965

Hughes, John G.: Critical path accounting in the construction industry. In: The Arthur Andersen Chronicle 22 (1962), 2. April, S. 31 - 53

IBM-Sonderdruck: General Information Manual Pert ..... a dynamic project planning and control method

sowie

Pert .... eine dynamische Methode zur Projektplanung und - überwachung; Ein-

führungsschrift; Sindelfingen: IBM - Deutschland 1961

IBM: Application Program Bulletin, IBM 7090 PERT COST Program, New York 1962

Reference Manual on Approach to Processing PERT Networks on the IBM 1410 - 1301 Data Processing System, New York 1962

Application Brief "The Rust Engineering Company Critical Path Technique of Scheduling and Control with the IBM 1620 Data Processing System, New York

General Information Manual The IBM Ramac 1410 for Integrated Planning and Control, Primary Metals, New York 1961

PERT COST, New York o.J.

Form 74842: Management Operating System - Planungs- und Steuerungssysteme für die Fertigung.

Kattwinkel, W.: Neue Methoden zur Projektplanung und -überwachung; Sonderdruck IBM Deutschland, August 1962

Über den Einsatz von Programmen zur Projektplanung bei Reihenfolgeproblemen; IBM - Nachrichten Nr. 165 (1964), S. 2264 ff.

Über zwei Anwendungsmöglichkeiten von Netzwerken mit gerichteten Teilstrecken. Sonderdruck IBM - Deutschland, Aug. 1962, IBM - Form 78 101.10.63

Kattwinkel, W. und Wild, H.J.: Netzwerktechnik - Praktische Erfahrungen; in: Neue Betriebswirtschaft 16 (1963), S. 212 ff. und 17 (1964), S. 9 ff.

IBM-Programme für Projektplanung und -überwachung mit Hilfe der Netzwerktechnik, Sonderdruck IBM - Deutschland, IBM - Form 78095

Kaufmann, A. und Desbazeille, G.: La Mèthode du chemin critique, Paris 1963

Kelley, J.E.: Parametric Programming and the Primal-Dual Algorithm; in: The J. of the Op. Res.Society of A., Vol. 7/No. 3, 1959, S. 327 ff.

Kelley, J.E. and Walker, M.R.: Critical-Path Planning and Scheduling; in: Proceedings of the Eastern Joint Computer Conference, Boston, Dec. 1959, S. 160 ff.

Kelley, J.E.: Critical-Path Planning and Scheduling: Mathematical Basis in: The J. of the Op. Res.Society of A., Vol. 9/No. 3, 1961, S. 296 ff.

Kelley, J.E.jr. and Walker, M.R.: Critical-Path Planning and Scheduling. An Introduction, Manuelly Associates, Ambler, Pennsylvania 1959

Klass, Ph.J.: PERT/PEP Management Tool Use Grows. In: Aviation Week and Space Technology, Nov. 28, 1960, S. 85 ff.

Klee, Victor: A String Algorithm for Shortest Paths in Directed Networks; in: Op.Res., Vol. 12 (1964) No. 3, S. 428 ff.

Krauss, W.: Über die Planung großer Entwicklungsvorhaben in: Unternehmungsforschung, Bd. 7, Heft 4, 1963, S. 151 ff.

Krüger, K.: Optimale Projektfortschrittsplanung; in: Sonderhefte der fortschrittlichen Betriebsführung; Berlin - Köln - Frankfurt 1962

Levy, F.K.; Thompson, G.L. and Wiest, J.B.: The ABC's of the Critical Path Method, in: Haw. Bus. Rev., Sept./Oct. 1963, S. 98 ff.

Multiship, Multishop, Workload - Smoothing Program in: Naval Research Logistics Quarterly 9 (1962) No. 1, S. 37 ff.

MacCrimmon, K.R. and Ryavec, Ch.A.: An Analytical Study of the Pert Assumptions; in: The J. of the Op. Res.Society of. A., Vol. 12/No. 1, 1964, S. 16 ff.

McGee, A.A.; Markarian, M.D.: "Optimum Allocation of Research Engineering Manpower Within a Multi-Project Organizational Structure", IBM No. 61-90-171, IBM Corporation, Federal Systems Division, Oswego, New York, Dec. 1961

Maidl, B.: Netzplantechnik-Methodik und Anwendungsmöglichkeiten für die Bauproduktion, in: Baumaschine und Bautechnik, 13. Jahrg., Heft 4, April 1966, S. 183 ff.

Malcohn, D.G.: Intergrated Research and Development Management Systems; in: Operations Research in Research and Development; New York, London 1963, S. 124 ff.

Malcohn, D.G.; Roseboom, J.H. and Clark, C.E., Fazar, W.: Application of a Technique for Research and Development Program Evaluation; in: The J. of the Op. Res. Society of A., Vol. 7/No. 5, 1959, S. 646 ff.

Malcohn, D.G.: Reliability Maturity Index (RMI) - An Extension of PERT into Reliability Management. in: The Journal of Industrial Engineering, Vol. 14/No. 1, Jan.-Febr. 1963, S. 3 ff.

Martino, R.L.: How "Critical-Path" Scheduling Works. in: Canadian Chemical Processing, Feb. 1960, S. 38 ff.

Mast, H.: Probleme der Rationalisierung im Baubetrieb; BW 11/57, 1960, S. 5

Materials Management Institute, Boston, Mass.: Controlling Contracts with PEP/PERT/CPM Introduction.

Controlling Contracts with PEP/PERT/CPM Work Shop in Advanced Procedures.

Mauchly, J.W.: Critical Path Scheduling; in: Chemical Engineering, April 16, 1962, S. 139 ff.

Mertens, P.: Die Berücksichtigung der Kostenwirkungen bei neueren Verfahren zur Projektplanung; in: Kostenrechenpraxis, Nr. 1, 1964, S. 9 ff.

Mertens, P.: Netzwerktechnik als Instrument der Planung; in: ZfB 1964, 34. Jhg., Nr. 6, S. 383 ff.

Mertens, P. und Webels, H.: Das PERT-System als Hilfsmittel der Unternehmungsplanung; in: Rationalisierung 1963, S. 87 ff.

Miller, R.W.: How to Plan and Control with PERT; in: Haward Business Review, March/April 1962, S. 93 ff.

Schedule, Cost, and Profit Control with Pert, New York, Toronto, London 1963

Moder, J.J. und Phillips: Project Management with CPM and PERT, New York - London 1961

Muth, J.F. und Thompson, G.L. (ed.): Industrial Scheduling, Engleword Cliffs, New York 1963

N.A.A. - Bulletin Jan. 1962: PERT-A Recent Control Concept

NASA: PERT Handbuch, Washington D.C. 1962

Norden, P.V.: Resource Usage and Network Planning Techniques; in: Op.Res. in R.D., S. 149 ff.

O'Brien, J.J.: CPM in construction management, New York 1966

Paige, H.W.: How PERT-Cost helps the general Manager; in: Haw. Bus. Rev., Nov/Dec 1963, S. 87 ff.

Pandit, N.N.S.: Some Observations on the Longest Path Problem, in: Op. Res., Vol. 12, No.2, S. 361 ff.

Paskman, M.; Livingston, J.St.: Is PERT what Management Needs?; in: Aerospace Management, Okt. 1962, S. 52 ff.

Pearlman, J.: Engineering Program Planning and Control Through the Use of Pert, in: IRE Transactions on Engineering Management, Dec. 1960, S. 125 ff.

Peart, R.M.; Randolph, R.H.; Bartlett, F.E.: The Shortest-Route Problem. in: The J. of the Op. Res. Society of A., Vol. 81 No. 6, 1960, S. 866 ff.

Pocock, J.W.: Pert as an Analytical Aid for Program Planning - its Payoff and Problems. in: The J. of the Op. Res. Society of A.; Vol. 10/No. 6, 1962, S. 893 ff.

Pollack, M.; Wiebenson, W.: Solutions of the Shortest-Route Problem - A Review. in: The J. of the Op. Res. Society of A., Vol. 8/No. 2, 1960, S. 224 ff.

Pollack, M.: The k-th Best Route Through a Network; in: The J. of the Op. Res. Society of A., Vol. 9/No. 4, 1961, S. 578 ff.

Pollack, M.; Wiebenson, W.: Solutions of the Shortest-Route Problem - a Review; in: Op. Res. 8 (1959), S. 224 - 230

Prager, W.: A structural method of computing project cost polygons, in: Management Science 9 (1963), 3. April, p. 394 - 404

Pulearic, Jos.A.: Critical Path Method Manuscript, Divisional Construction Sales Meeting 1961

Remington-Rand-Sonderdruck: Planung mit PERT und CPM. UVF Operations Research Mitteilung Nr. 233023 162

sowie

Bedienungsanleitung und Lochanweisung für das Univac - not - I - 90 Karten-Programm CPM Nr. 233023 263

RKW-Auslandsdienst: Ablauf- und Planungsforschung, Operations Research, Heft 56, München 1958

Sayer, J.S.; Kelley, J.E.; Walker, M.R.: Critical-Path Scheduling; in: Factory, July 1960, S. 74 ff.

Special Projects Office: PERT, Summary Report Phase I u. Phase II, Office der US Navy, Sept. 1958

sowie

PERT Data Processing Lesson Plan, Handbook for Technicians, Sonderdruck Nov. 1960

Schmidt, H.Th.: Sonderprobleme der Bereitstellungs- und Ablaufplanung, in: Baubetrieb, Beilage Bauwirtschaft, Nr. 8, 1962

Schmidt, H.Th.: Die Sonderprobleme der Bereitstellungs- und Ablaufplanung im Baubetrieb, in: Baubetriebswirtschaft 8/1962/Beilage zu Bau und Bauindustrie), S. 57 ff.

Schöllhammer, Hans: Das PERT-System, in: ZfbF, 17. Jhg. 1965, Heft 1, S. 207 ff.

Steigewald, H.J.: Kann man im Bereich der Forschung und Entwicklung planen?; Rationalisierung 13 (1962), Heft 9; Sept., S. 217 f.

Stilian, Gabriel N. and others: PERT - a new management planning and control technique; New York: American Management Association 1962, AMA Management Reports No. 74

Stives, D.M.; Murphy, M.M.: PERT and CPM Modern Management Methods, Boston 1962

Tebo, R.M.: Pert-Cost, Sonderdruck der Spark Plug, The Electronics Division of General Motors.

Thumb, N.: Netzplantechnik, in: Zeitschr. für wirtschaftliche Fertigung, Heft 5, 1965

Netzplantechnik; in: Zeitschrift für wirtschaftliche Fertigung, Heft 6, Juni 1964

Tonka, L.: Simulationsbeispiel aus der Netzplantechnik, in: Industrielle Organisation Heft 8, 1964, S. 317 ff.

Univac Applications Research Center: The Construction Scheduling Problem; Minneapolis, Minnesota, 25. Apr. 1957

sowie

Extension of the Construction Scheduling Problem a Computational Algorithm; Minneapolis, Minnesota 1958

Univac Remington Rand: Network Planning and Analysis, St. Paul, Minnesota 1962

Van Slyke, R.M.: Monte Carlo Methods and the Pert Problem. in: The J. of the Op. Res. Society of A., Vol. 11/No. 5, 1963, S. 839 ff.

Wagner, G.: Netzwerk-Methoden, in: Architekt und Ingenieur 15 (1964) Heft 2, S. 5 ff.

PERT und CPM - Neue Planungsinstrumente zur Abstimmung komplexer Abläufe und Vorgänge; in: Die Lochkarte, 27.Jhg., Heft 191, 1963, S. 13 ff.

Waldron, A.J.: Fundamentals of PERT Planning and Control

The Use of PERT in Scheduling Manufacturing Operations, in: Society of Automotive Engineers National Production Meeting 1963

Weber, K.: Planung mit CPM und PERT; in: Industrielle Organisation, Heft 1 und 2, 1963

Wiest, Jerome, D.: Some Properties of Schedulesfor Large Projects with Limited Resources; in: Op. Res., Vol.12 (1964), No. 3, S. 395 ff.

"The Scheduling of Large Projects with Limited Resources" doctoral dissertation O.N.R. Research Memorandum No. 113, Graduate School of Industrial Administration, Carnigie Institute of Technology, Pittsburgh, Pa. 1963

Wyune, B.E.Jo.: CPM - An Effective Management Tool; in: The Controller 1962

ANHANG

Praktisches Beispiel für die Struktur- und Zeitanalyse

Aktivitätenliste: Neubau eines Kasernen-Komplexes

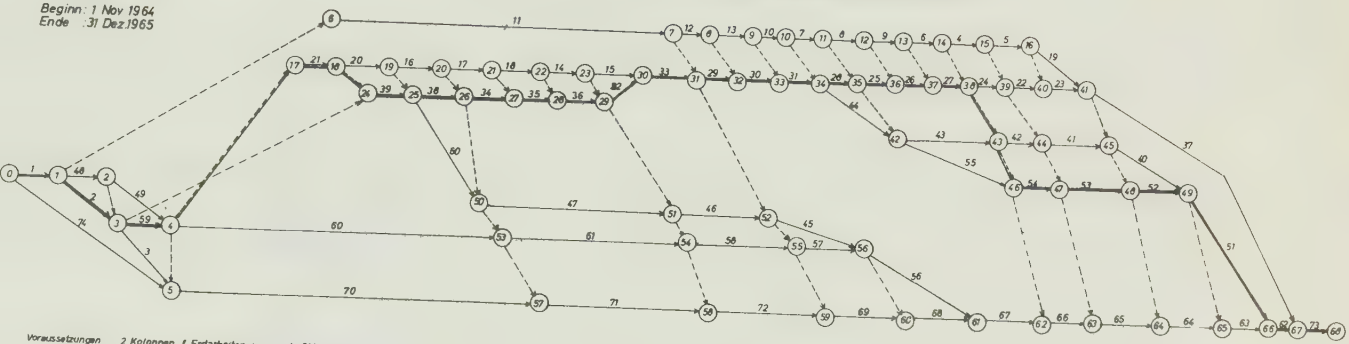
i bis j	Bezeichnung der Aktivität	Zeit in Arb.Tagen
0 - 1	1. Baustelleneinrichtung für Erdarbeiten	14
1 - 3	2. " " Betonarbeiten	10
3 - 5	3. " " Gebäude, Montage	10
14 - 15	4. Erdarbeiten f. Bunker I v. Gebäude 14	4
15 - 16	5. " " " II " " 14	4
13 - 14	6. " " " " " 13	4
10 - 11	7. " " " I " " 12	4
11 - 12	8. " " " II " " 12	4
12 - 13	9. " " " III " " 12	4
9 - 10	10. " " " " " 11	4
6 - 7	11. " " " I " " 10	4
7 - 8	12. " " " II " " 10	4
8 - 9	13. " " " III " " 10	4
22 - 23	14. " " " I " " 9	4
23 - 30	15. " " " II " " 9	4
19 - 20	16. " " " I " " 8	4
20 - 21	17. " " " II " " 8	4
21 - 22	18. " " " III " " 8	4
16 - 41	19. " " " " " 7	4
18 - 19	20. " " " " " 2	4
17 - 18	21. " " " " " 5	4
39 - 40	22. Betonieren Bunker I v. Gebäude 14	10
40 - 41	23. " " II " " 14	10
38 - 39	24. " " " " 13	10
35 - 36	25. " " I " " 12	10
36 - 37	26. " " II " " 12	10
37 - 38	27. " " III " " 12	10
34 - 35	28. " " " " 11	10
31 - 32	29. " " I " " 10	10
32 - 33	30. " " II " " 10	10
33 - 34	31. " " III " " 10	10
29 - 30	32. " " I " " 9	10
30 - 31	33. " " II " " 9	10
26 - 27	34. " " I " " 8	10
27 - 28	35. " " II " " 8	10
28 - 29	36. " " III " " 8	10
41 - 67	37. " " " " 7	10
25 - 26	38. " " " " 2	10
24 - 25	39. " " " " 5	10

i bis j	Bezeichnung der Aktivität	Zeit in Arb.Tagen
45 - 49	40. Erdarbeiten für Gebäude 14	8
44 - 45	41. " " " 13	6
43 - 44	42. " " " 12	8
42 - 43	43. " " " 11	6
34 - 42	44. " " " 10	8
52 - 56	45. " " " 9	8
51 - 52	46. " " " 8	8
50 - 51	47. " " " 2	6
1 - 2	48. " " " 3	6
2 - 4	49. " " " 4	6
25 - 50	50. " " " 5	6
49 - 66	51. Betonieren Keller für Gebäude 14	30
48 - 49	52. " " " " 13	20
47 - 48	53. " " " " 12	30
46 - 47	54. " " " " 11	20
42 - 46	55. " " " " 10	30
56 - 61	56. " " " " 9	30
55 - 56	57. " " " " 8	30
54 - 55	58. " " " " 2	20
3 - 4	59. " " " " 3	20
4 - 53	60. " " " " 4	20
53 - 54	61. " " " " 5	20
66 - 67	62. Montage, Gebäude 14	11
65 - 66	63. " " 13	6
64 - 65	64. " " 12	11
63 - 64	65. " " 11	6
62 - 63	66. " " 10	11
61 - 62	67. " " 9	11
60 - 61	68. " " 8	11
59 - 60	69. " " 2	6
5 - 57	70. " " 3	6
57 - 58	71. " " 4	6
58 - 59	72. " " 5	6
67 - 68	73. Baustellenräumung	10
0 - 5	74. Anlieferung Fertigteile	140

Flussdiagramm.

NEUBAU EINES KASERNENKOMPLEXES AUS FERTIGTEILEN

Beginn: 1 Nov 1964
Ende : 31 Dez 1965

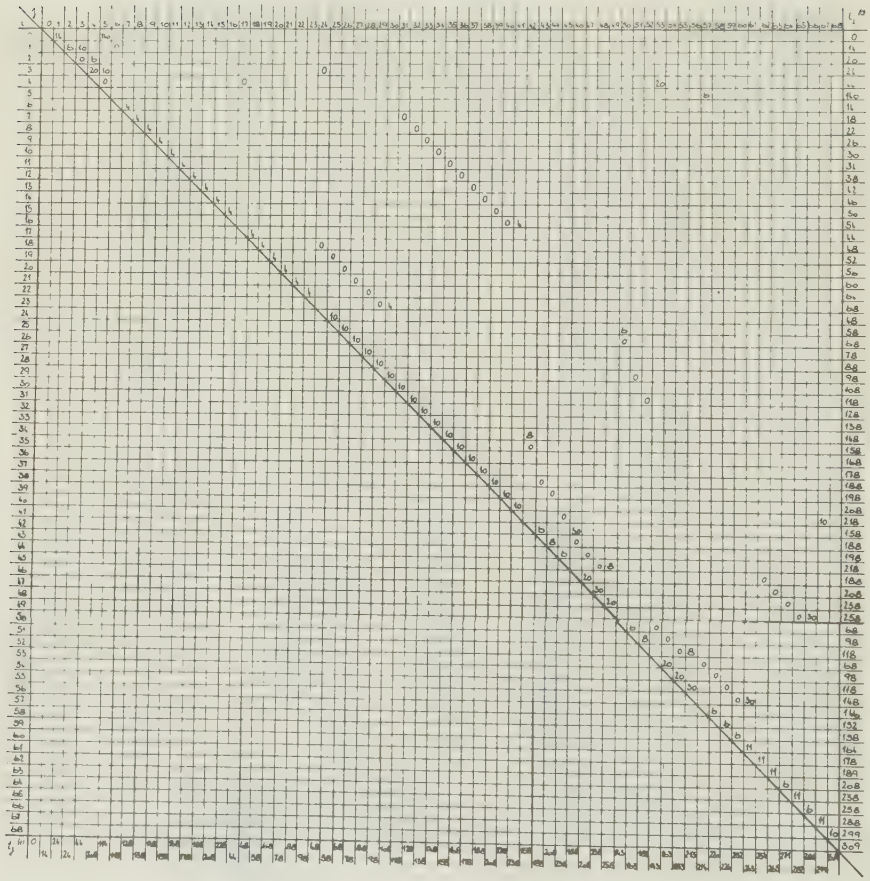


Voraussetzungen
2 Kolonnen f Erdarbeiten an versch Objekten
2 " " Kellerbau " " "
2 " " Bunkerbau " einem Objekt
1 Kolonne " Gebäude Montage
Erdarbeiten für Gebäude können erst beginnen, wenn dazugehörige Bunker betoniert sind

= kritischer Weg = 309 Arbeitstage

NEUBAU EINES KASERNENKOMPLEXES AUS FERTIGTEILEN

ERMITTLUNG DER FRÜHESTMÖGLICHEN STARTZEITPUNKTE $t_i^{(0)}$ UND
DER SPÄTESTMÖGLICHEN ENDZEITPUNKTE $t_j^{(1)}$



Neubau eines Kasernenkomplexes

Start- u. Endtermine, Schlupfzeiten (nach Arbeitstagen)

i - j	Aktivität Nr.	Dauer der Aktivität	Beginn frühest.	Ende frühest.	Beginn spätest.	Ende spatest.	kritische Aktivitäten	Gesam schlup
0 - 1	1.	14	0	14	0	14	X	0
1 - 3	2.	10	14	24	14	24	X	0
3 - 5	3.	10	24	34	198	208		174
14 - 15	4.	4	46	50	204	208		158
15 - 16	5.	4	50	54	224	228		174
13 - 14	6.	4	42	46	184	188		142
10 - 11	7.	4	30	34	154	158		124
11 - 12	8.	4	34	38	164	168		130
12 - 13	9.	4	38	42	174	178		136
9 - 10	10.	4	26	30	144	148		118
6 - 7	11.	4	14	18	114	118		100
7 - 8	12.	4	18	22	124	128		106
8 - 9	13.	4	22	26	134	138		112
22 - 23	14.	4	64	68	94	98		30
23 - 30	15.	4	68	72	104	108		36
19 - 20	16.	4	52	56	64	68		12
20 - 21	17.	4	56	60	74	78		18
21 - 22	18.	4	60	64	84	88		24
16 - 41	19.	4	54	58	234	238		180
18 - 19	20.	4	48	52	54	58		6
17 - 18	21.	4	44	48	44	48	X	0
39 - 40	22.	10	198	208	218	288		20
40 - 41	23.	10	208	218	228	238		20
38 - 39	24.	10	188	198	198	208		10
35 - 36	25.	10	158	168	158	168	X	0
36 - 37	26.	10	168	178	168	178	X	0
37 - 38	27.	10	178	188	178	188	X	0
34 - 35	28.	10	148	158	148	158	X	0
31 - 32	29.	10	118	128	118	128	X	0
32 - 33	30.	10	128	138	128	138	X	0
33 - 34	31.	10	138	148	138	148	X	0
29 - 30	32.	10	98	108	98	108	X	0
30 - 31	33.	10	108	118	108	118	X	0
26 - 27	34.	10	68	78	68	78	X	0
27 - 28	35.	10	78	88	78	88	X	0
28 - 29	36.	10	88	98	88	98	X	0
41 - 67	37.	10	218	228	289	299		71
25 - 26	38.	10	58	68	58	68	X	0
24 - 25	39.	10	48	58	48	58	X	0
45 - 49	40.	8	218	226	250	258		32
44 - 45	41.	6	198	204	232	238		34
43 - 44	42.	8	188	196	200	208		12
42 - 43	43.	6	158	164	182	188		24
34 - 42	44.	8	148	156	150	158		2
52 - 56	45.	8	118	126	205	213		87
51 - 52	46.	8	98	106	175	183		77
50 - 51	47.	6	68	74	157	163		89
1 - 2	48.	6	14	20	18	24		4
2 - 4	49.	6	20	26	38	44		18
25 - 50	50.	6	58	64	137	143		79
49 - 66	51.	30	258	288	258	288	X	0
48 - 49	52.	2o	238	258	238	258	X	0
47 - 48	53.	3o	208	238	208	238	X	0
46 - 47	54.	20	188	208	188	208	X	0
42 - 46	55.	30	158	188	158	188	X	0
56 - 61	56.	30	148	178	213	243		65
55 - 56	57.	30	118	148	183	213		65
54 - 55	58.	20	98	118	163	183		65
3 - 4	59.	20	24	44	24	44	X	0
4 - 53	60.	20	44	64	123	143		79
53 - 54	61.	20	68	88	143	163		75
66 - 67	62.	11	288	299	288	299	X	0
65 - 66	63.	6	258	264	282	288		24
64 - 65	64.	11	238	249	271	282		33
63 - 64	65.	6	208	214	265	271		57
62 - 63	66.	11	189	200	254	265		65
61 - 62	67.	11	178	189	243	254		65
60 - 61	68.	11	164	175	232	243		68
59 - 60	69.	6	158	164	226	232		68
5 - 57	70.	6	140	146	208	214		68
57 - 58	71.	6	146	152	214	220		68
58 - 59	72.	6	152	158	220	226		68
67 - 68	73.	10	299	309	299	309	X	0
0 - 5	74.	140	0	140	68	208		68

Termine:

Neubau eines Kasernen-Komplexes

Fertiggestellt im Monat:

Bezeichnung:	Nov. 64	Dez. 64	Jan. 65	Febr. 65	März 65	Apr. 65	Mai 65	Juni 65	Juli 65	Aug. 65	Sept. 65	Okt. 65	Nov 65
1. Baustelleneinr. Erdarbeiten	X												
2. " Betonarbeiten	X												
3. " Montage						X							
4. Erdarbeiten Bunker I /14			X										
5. " " II /14			X										
6. " " 13		X											
7. " " I /12		X											
8. " " II /12		X											
9. " " III /12		X											
10. " " 11		X											
11. " " I /10	X												
12. " " II /10	X												
13. " " III /10		X											
14. " " I / 9			X										
15. " " II / 9			X										
16. " " I / 8			X										
17. " " II / 8			X										
18. " " III / 8			X										
19. " " 7			X										
20. " " 2			X										
21. " " 5		X											
22. Betonieren " I /14									X				
23. " " II /14										X			
24. " " 13									X				
25. " " I /12							X						
26. " " II /12								X					
27. " " III /12								X					
28. " " 11							X						
29. " " I /10						X							
30. " " II /10						X							
31. " " III /10							X						
32. " " I / 9					X								
33. " " II / 9					X								
34. " " I / 8				X									
35. " " II / 8				X									
36. " " III / 8					X								
37. " " 7									X				
38. " " 2			X										
39. " " 5			X										
40. Erdarbeiten Gebäude 14									X				
41. " " 13									X				
42. " " 12								X					
43. " " 11							X						
44. " " 10							X						
45. " " 9						X							
46. " " 8					X								
47. " " 2			X										
48. " " 3	X												
49. " " 4		X											
50. " " 5			X										
51. Betonieren Keller 14												X	
52. " " 13											X		
53. " " 12										X			
54. " " 11									X				
55. " " 10								X					
56. " " 9							X						
57. " " 8						X							
58. " " 2					X								
59. " " 3		X											
60. " " 4			X										
61. " " 5				X									
62. Montage Gebäude 14													X
63. " " 13											X		
64. " " 12											X		
65. " " 11									X				
66. " " 10									X				
67. " " 9								X					
68. " " 8							X						
69. " " 2						X							
70. " " 3							X						
71. " " 4							X						
72. " " 5							X						
73. Baustellenräumung													X
74. Anlieferung Fertigteile													

L E B E N S L A U F

Am 28. 9.1939 wurde ich in Königsberg/Pr., als einziges Kind des Baumeisters Hanns Ebel und seiner Ehefrau Johanna, geb. Wiegand, geboren.

Nach der Vertreibung aus Ostpreußen erfolgte meine Einschulung 1946 in Göttingen-Weende, wo ich bis zu meinem Wechsel zum Gymnasium verblieb. Am 1. März 1960 bestand ich die Reifeprüfung.

Das wirtschaftswissenschaftliche Studium habe ich im Sommersemester 1960 an der Phillips-Universität Marburg aufgenommen.

Im Sommersemester 1961 setzte ich mein Studium an der Georg-August-Universität Göttingen fort. Nach dem achten Semester legte ich hier - in Göttingen - am 12. Mai 1964 die Prüfung für Diplom-Kaufleute ab. Seitdem beschäftige ich mich mit meiner Dissertation.

Hans-Jürgen Ebel

BAMBERGER FOTODRUCK · Rudolf Rodenbusch